

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ - TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA
FAKULTA METALURGIE A MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ
KATEDRA MATERIÁLŮ A TECHNOLOGIÍ PRO AUTOMOBILY

MECHANICKÉ VLASTNOSTI 3D TISKU

MECHANICAL PROPERTIES OF 3D PRINTED MATERIALS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

AUTOR PRÁCE:

DOMINIK JANEČZKO

VEDOUCÍ PRÁCE:

Ing. VLADIMÍR ZBOŽÍNEK

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství
Katedra materiálů a technologií pro automobily

Zadání bakalářské práce

Student: **Dominik Janeczko**
Studijní program: B3923 Materiálové inženýrství
Studijní obor: 3911R034 Materiály a technologie pro automobilový průmysl
Téma: **Mechanické vlastnosti 3D tiskem připravených materiálů**
Mechanical properties of 3D printed materials

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Teoretický rozbor
2. Mechanické vlastnosti plastů a jejich zkoušení
3. Návrh vzorků pro zkoušení
4. Vyhodnocení

Seznam doporučené odborné literatury:

[1] Ian Gibson, David W. Rosen and Brent Stucker. Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing. ISBN -10 : | 441911 197 . ISBN- 1 3 : 978-144191 1 193.

[2] ČSN EN ISO 527-1. Plasty: stanovení tahových vlastností. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.


[3] CHUA, C.K., K.F. LEONG a C.S. LIM. Rapid Prototyping: Principles and Applications. 3. vyd. Singapore: World Scientific Publishing Co., 2010, 512 s. ISBN 978-981-277-897-0.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

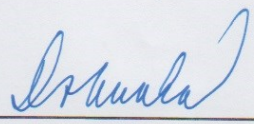
Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Vladimír Zbožíněk**

Datum zadání: 30.11.2017

Datum odevzdání: 30.04.2018


doc. Ing. Petr Tomčík, Ph.D.
vedoucí katedry




prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.
děkanka fakulty

Zásady pro vypracování bakalářské práce

I.

Bakalářskou prací (dále jen BP) se ověřují vědomosti a dovednosti, které student získal během studia, a jeho schopnosti využívat je při řešení teoretických i praktických problémů.

II.

Uspořádání bakalářské práce:

- | | |
|--|------------------------------|
| 1. Titulní list | 6. Obsah BP |
| 2. Originál zadání BP | 7. Textová část BP |
| 3. Zásady pro vypracování BP | 8. Seznam použité literatury |
| 4. Prohlášení + místopřísežné prohlášení | 9. Přílohy |
| 5. Abstrakt + klíčová slova česky a anglicky | |

ad 1) Titulní list je koncipován podle požadavků příslušné oborové katedry.

ad 2) Originál zadání BP obdrží student na oborové katedře.

ad 3) Tyto „Zásady pro vypracování bakalářské práce“ následují za originálem zadání BP. („Zásady pro vypracování bakalářské práce“ jsou ke stažení na webových stránkách fakulty).

ad 4) Prohlášení + místopřísežné prohlášení napsané na zvláštním listu (ke stažení na webových stránkách fakulty) a vlastnoručně podepsané studentem s uvedením data odevzdání BP. V případě, že BP vychází ze spolupráce s jinými právníckými a fyzickými osobami a obsahuje citlivé údaje, je na zvláštním listě vloženo prohlášení spolupracující právnické nebo fyzické osoby o souhlasu se zveřejněním BP.

ad 5) Abstrakt a klíčová slova jsou uvedena na zvláštním listu česky a anglicky v rozsahu max. 1 strany pro obě jazykové verze.

ad 6) Obsah BP se uvádí na zvláštním listu. Zahrnuje názvy všech číslovaných kapitol, podkapitol a statí textové části BP, odkaz na seznam příloh a seznam použité literatury, s uvedením příslušné stránky. Předpokládá se desetinné číslování.

ad 7) Textová část BP obvykle zahrnuje:

- Úvod, obsahující charakteristiku řešeného problému a cíle jeho řešení v souladu se zadáním BP;
- Vlastní rozpracování BP (včetně obrázků, tabulek, výpočtů) s dílčími závěry, vhodně členěné do kapitol a podkapitol podle povahy problému;
- Závěr, obsahující celkové hodnocení výsledků BP z hlediska stanoveného zadání.

BP bude zpracována v rozsahu min. 25 stran (včetně obsahu a seznamu použité literatury).

Text musí být napsán vhodným textovým editorem počítače po jedné straně bílého nelesklého papíru formátu A4 při respektování následující **doporučené** úpravy - písmo Times New Roman 12b; řádkování 1,5; okraje – horní, dolní – 2,5 cm, levý – 3 cm, pravý 2 cm. Fotografie, schémata, obrázky, tabulky musí být očíslovány a musí na ně být v textu poukázáno. Budou zařazeny průběžně v textu, pouze je-li to nezbytně nutné, jako přílohy (viz ad 9).

Odborná terminologie práce musí odpovídat platným normám. Všechny výpočty musí být přehledně uspořádány tak, aby každý odborník byl schopen přezkoušet jejich správnost. Matematické vzorce musí být číslovány (v kulatých závorkách). U vzorců, údajů a hodnot převzatých z odborné literatury nebo z praxe musí být uveden jejich pramen - u literatury citován číselným odkazem (v hranatých závorkách) na seznam použité literatury. Nedostatky ve způsobu vyjadřování, nedostatky gramatické, neopravené chyby v textu mohou snížit klasifikaci práce.

- ad 8) BP bude obsahovat alespoň 10 literárních odkazů, z toho nejméně 3 v některém ze světových jazyků.
Seznam použité literatury se píše na zvláštním listě. **Citaci literatury je nutno uvádět důsledně v souladu s ČSN ISO 690.** Na práce uvedené v seznamu použité literatury musí být uveden odkaz v textu BP.
- ad 9) Přílohy budou obsahovat jen ty části (speciální výpočty, zdrojové texty programů aj.), které nelze vhodně včlenit do vlastní textové části, např. z důvodu ztráty srozumitelnosti.

III.

Bakalářskou práci student odevzdá ve dvou knihařsky svázaných vyhotoveních, pokud katedra garantující studijní obor neurčí jiný počet. Vnější desky budou označeny takto:

nahoře: *Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava*
Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství
Katedra

uprostřed: *BAKALÁŘSKÁ PRÁCE*

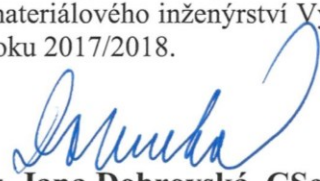
dole: *Rok* *Jméno a příjmení*

Kromě těchto dvou knihařsky svázaných výtisků odevzdá student kompletní práci také v elektronické formě do IS EDISON. Práce vložená v elektronické formě do IS EDISON se musí zcela shodovat s prací odevzdanou v tištěné formě. Po vložení BP do IS EDISON bude provedena její kontrola na plagiátorství.

IV.

Nesplnění výše uvedených zásad pro vypracování bakalářské práce může být důvodem nepřijetí práce k obhajobě. O nepřijetí práce k obhajobě rozhoduje v tomto případě garant příslušného studijního oboru. Tyto zásady jsou závazné pro studenty všech studijních programů a forem bakalářského studia fakulty metalurgie a materiálového inženýrství Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava od akademického roku 2017/2018.

Ostrava 13. 11. 2017


Prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.
děkanka fakulty metalurgie a materiálového inženýrství
VŠB-TU Ostrava

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- jsem byl(a) seznámen(a) s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména §35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního (§60 - školní dílo);
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB - TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odst. 3);
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude archivována v elektronické formě v databázi Ústřední knihovny VŠB - TUO a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO;
- bylo sjednáno, že s VŠB - TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona;
- bylo sjednáno, že užít své dílo - bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB - TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB - TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že odevzdáním své bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (Zákon o vysokých školách) bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Místopřisežně prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci vypracoval(a) samostatně.

V Ostravě

30.4.2018

Dominik Jureczko

podpis (jméno a příjmení studenta)

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce je orientována na mechanické vlastnosti materiálů, uplatňujících se ve 3D tisku. Materiály budou vytisknuty metodou FDM a následně budou testovány jejich tahové vlastnosti. Pro tahovou zkoušku bylo vybráno celkem 7 polymerních materiálů, používajících se pro tisk FDM metodou. Každý materiál byl vytisknut ve třech sadách s odlišnou výškou nanášené vrstvy.

Cílem této bakalářské práce je srovnání mechanických vlastností vybraných polymerních materiálů, pomocí tahové zkoušky. Hodnoty získané z tahové zkoušky budou zaznamenány v tabulkách a grafech, ze kterých budou zhotovena výsledná srovnání materiálů.

KLÍČOVÁ SLOVA

FDM, 3D tisk, mechanické vlastnosti, zkouška tahem

ABSTRACT

This bachelor thesis is focused on mechanical properties of materials used in 3D printing. These materials will be printed using the FDM method and then their tensile properties will be tested. A total of 7 polymeric materials used for FDM printing were selected for the tensile test. Each material was printed in three sets of different layer thicknesses.

The aim of this bachelor thesis is to compare the mechanical properties of selected polymer materials, by using tensile test. The values obtained from tensile test will be recorded in the tables and graphs from which the resulting comparison of the materials will be made.

KEYWORDS

FDM, 3D print, mechanical properties, tensile test

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Vladimíru Zbožinkovi za cenné rady a připomínky. Také bych chtěl poděkovat paní Ing. Petře Váňové, Ph.D. za odborný dohled a rady související s praktickou částí bakalářské práce.

Obsah

Úvod	10
1 Teoretický rozbor	11
1.1 Historie.....	11
1.2 Současnost	12
1.3 Průběh/ Princip 3D tisku.....	12
1.4 Technologie 3D tisku.....	14
1.5 FDM technologie (Fused deposition Modeling).....	17
2 Mechanické vlastnosti plastů a jejich zkoušení.....	20
2.1 ABS (Akrylonitrilbutadienstyren)	21
2.2 PLA (Polylactid acid)	21
2.3 PC (Polykarbonát).....	21
2.4 PET (Polyethyléntereftalát)	22
2.5 Nylon (Polyamid)	22
2.6 ASA (Akrylonitril-styren-akryl)	22
2.7 CPE HG100 (Kopolyester)	23
2.8 HTPLA/ HD PLA (High temperature PLA).....	23
2.9 PP (Polypropylen).....	23
2.10 Mechanické vlastnosti a charakteristiky polymerů	24
2.11 Zkouška tahem	25
2.11.1 Průběh tahové zkoušky	26
2.11.2 Mechanické charakteristiky	27
2.12 Statická zkouška v ohybu	30
2.12.1 Průběh zkoušky	30
2.12.2 Mechanické charakteristiky	31

2.13	Zkouška tlakem	34
2.13.1	Průběh tlakové zkoušky	34
3	Návrh vzorků pro zkoušení	36
3.1	Návrh modelu pro tahovou zkoušku	36
3.2	Tisk vzorků	37
3.3	Žihání HD PLA	44
3.3.1	Pracovní postup	45
3.4	Tahová zkouška	46
3.4.1	Průběh tahové zkoušky	47
4	Výhodnocení	49
4.1	ABS	50
4.2	HDZ	51
4.3	ASA	52
4.4	PET	53
4.5	CPE	54
4.6	HD	55
4.7	PLA	56
4.8	Celkové výsledky	57
	Závěr	59
	Bibliografie	60
	Seznam obrázků	64
	Seznam příloh	66

ÚVOD

V teoretické části této bakalářské práce se obecně seznámíme s 3D tiskem. Také se seznámíme s historií a současnou situací 3D tisku, řekneme si něco o průběhu 3D tisku a přiblížíme si některé technologie, které se v tomto odvětví uplatňují.

Dalším bodem teoretické části budou mechanické vlastnosti plastů a jejich zkoušení. Řekneme si zde něco k polymerním materiálům, využívajícím se k 3D tisku. Stručně si popíšeme některé konkrétní materiály, které budeme v této práci využívat. Obeznámíme se také s mechanickými vlastnostmi a základními mechanickými zkouškami.

Praktická část bude obsahovat návrh zkušebního vzorku a následné testování mechanických vlastností prostřednictvím zkoušky tahem. Cílem této práce je zjistit závislost výšky nanášené vrstvy tisku na mechanické vlastnosti materiálu. Konkrétně bylo vybráno sedm materiálů, z nichž každý obsahoval celkem 3 různá nastavení výšky nanášené vrstvy. Stručně si zde popíšeme tiskárnu, na které se testované vzorky tiskly a ukážeme si nastavení samotného tisku.

Praktická část obsahuje také pracovní postup při žíhání jednoho z využívaných materiálů, tahovou zkoušku, která zahrnuje přípravu vzorků, nastavení trhačního stroje a samotný průběh zkoušky. Celou praktickou část pak završíme vyhodnocením mechanických vlastností.

1 TEORETICKÝ ROZBOR

V této kapitole se budeme zabývat historií a současností 3D tisku. Ukážeme si některé technologie a princip/průběh 3D tisku.

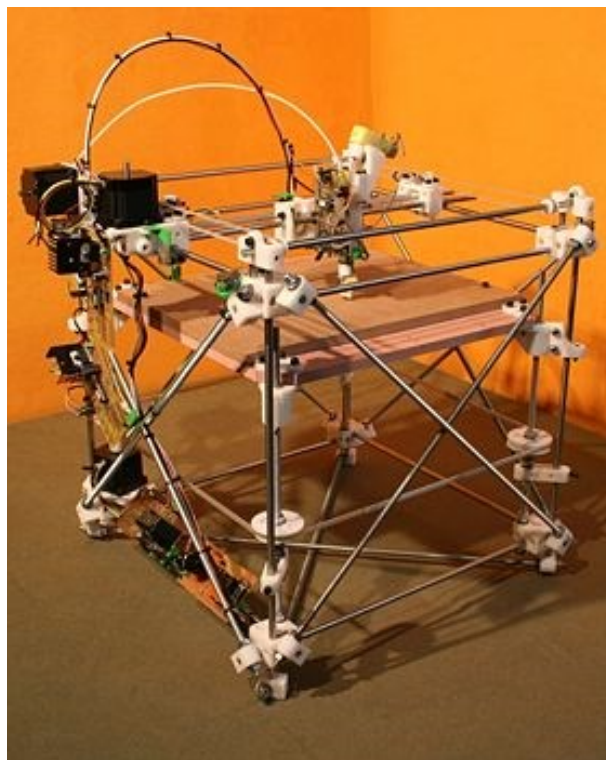
1.1 Historie

3D tisk začal vznikat ve druhé polovině 20. století, a to v roce 1986, kdy byla patentována technologie stereolitografie. Tato technologie vznikla díky muži jménem Charles Hull, který roku 1984 zkoumal fotopolymery inkoustových tiskáren se záměrem o nalezení fyzikálních vlastností, zapříčiňující tuhnutí materiálu, na kterého rovněž působilo UV světlo. [1]

Stereolitografie je název metody, která spočívá ve vytváření objektů pomocí aditivního procesu. Velkou roli zde hraje UV záření, které o určité vlnové délce působí na fotopolymery, a tím je postupně vytvrzuje. Daný předmět je tedy vytvářen z vrstev, které se na sebe postupně nanášejí.

Postupem času byly pak prezentovány další technologie, z nichž největší převrat přinesla technologie FDM (Fused Deposition Modeling, kterou v roce 1988 představil Scott Crump a technologie SLS (Selective Laser Sintering), vyvinutá Dr. Carlem Deckardem a Dr. Joe Beamanem v polovině osmdesátých let. [1] [2]

Revoluce 3D tisku nastala roku 2005, iniciativou Dr. Adrianem Bowyerem vyrobit takovou 3D tiskárnu, která by si byla schopna replikovat své součástky. Tímto úkonem se měly snížit náklady na výrobu a tím pádem i zvýšit dostupnost pro širokou veřejnost. Vzniká tedy projekt RepRap, ze kterého roku 2008 vzešla první verze této tiskárny. Jednalo se o amoremplikační tiskárnu Darwin. Prostřednictvím této tiskárny pak mohly být vytisknuty další. [1]



Obr. č. 1 RepRap tiskárna, převzato z [3]

1.2 Současnost

Současná situace je taková, že 3D tisk nachází uplatnění v mnoha sférách jako například automobilový průmysl, stavebnictví, potravinářský průmysl, zdravotnictví a mnoho dalších. 3D tiskárny disponují obrovským potenciálem, proto se jejich využití rozrůstá každým dnem. Do budoucna je možné, že každý domácnost bude vlastnit svou 3D tiskárnu a využívat ji k vytvoření potřebných věcí.

1.3 Průběh/ Princip 3D tisku

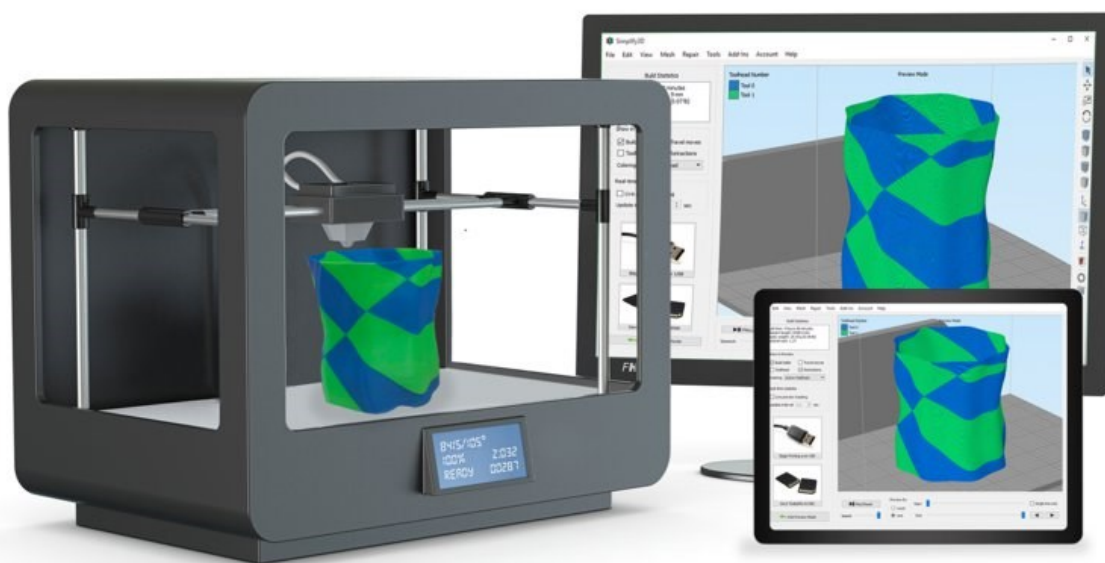
Za 3D tisk považujeme způsob výroby trojrozměrných objektů, prostřednictvím 3D tiskárny. Při tomto procesu se materiál neodebírá, ale postupně přidává, proto nazýváme tento proces tzv. aditivním procesem.

Pokud chceme vytisknout určitý předmět, je nutné nejprve vyhotovit jeho virtuální návrh. K tomu je zapotřebí software, určený pro modelování v 3D. Nejčastějším a nejpoužívanějším softwarem je Computer Aided Design, známý spíše pod zkratkou CAD.

Máme-li model v CADu vytvořen, je nutné jej převést na formát, který přečte software tiskárny. Tento formát se nazývá stereolithography, zkratkou (STL.). Existují také 3D skenery, které udělají přesnou digitální kopii daného předmětu, v těchto případech pak není virtuální návrh v softwaru nutný.

V dalším kroku je třeba vytvořit instrukce pro samotnou tiskárnu. Tyto instrukce nesou název G-Code a obsahují například ovládání trysek, pohyb motorů a další nezbytně nutné parametry pro tisk. Lze je vytvořit v programu Cura, Skeinforge nebo například Slic3r.

Po splnění těchto bodů může dojít k samotnému tisku, kdy požadovaný objekt vzniká postupným nanášením materiálu. Nanášená probíhá ve velmi tenkých vrstvách, které prostřednictvím tavení nebo lepení spojují. Výsledný produkt se pak dle potřeby povrchově upravuje. [4]



Obr. č. 2 3D software, převzato z [5]

1.4 Technologie 3D tisku

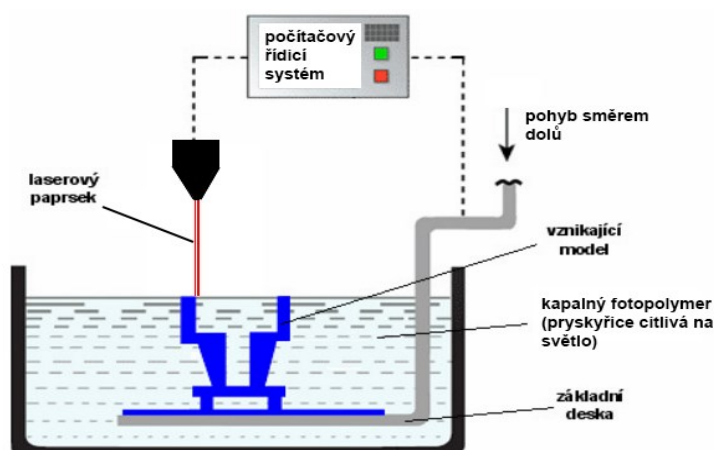
3D tisk dnes nachází uplatnění stále ve více odvětvích. Je proto nezbytnou nutností, aby daná technologie vyhovovala různým požadavkům, a proto si je potřeba uvědomit, co se vlastně bude po dané tiskárně požadovat.

Technologie 3D tisku ovlivňují mnohé aspekty, jako jsou například mechanické vlastnosti materiálu, výrobní doba a mnoho dalších. Dnes se zatím nesetkáváme s technologií, která by zvládla veškerá použití.

Technologie SLA (Stereolithography)

Dnes už velmi rozšířená technologie, pro tvorbu trojrozměrných objektů. Je zde využíván ultrafialový laserový paprsek, který vytvrzuje daný materiál, podobný pryskyřici, za působení UV záření. Jednotlivé vrstvy jsou vykreslovány na hladinu polymerní tekutiny, kdy se na vytvrzenou vrstvu postupně nanáší další a další.

Využití této technologie se uplatňuje převážně tehdy, je-li nutnost dodržet dané rozměrové a tvarové hodnoty. Výhodou je také hladký povrch vytisknutého objektu. [6] [7]



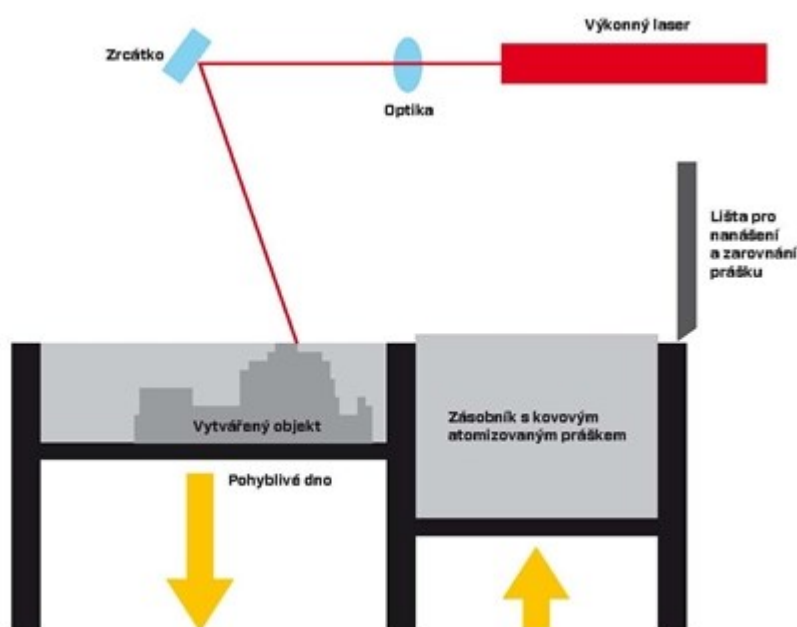
Obr. č. 3 SLA tech., převzato z [8]

Technologie SLS (Selective laser sintering)

Jedna z dalších nejpoužívanějších technologií je SLS. Tato technologie je velmi podobná technologii SLA, avšak oproti SLA, která využívá pro tisk tekutý materiál, využívá SLS postupné tavení práškového materiálu. V mnoha případech se jedná o prášek, podobný sádře, který je vytvrzován pomocí nanášeného lepidla. Nemusí se zde však používat pouze prášek, využívá se například i kov, který je pak vytvrzován vysoce výkonným laserem.

Stejně jako u SLA, se zde využítí aditivní metoda, kdy se na plochu platformy nanese první vrstva prášku, která se následně vytvrdí a následně jsou na ní nanášeny další vrstvy.

Uplatnění nachází převážně pro automobilový a strojírenský průmysl. Výhodou SLS je možnost barevného tisku s vysokými detaily a využití většího množství práškového materiálu, jako například plast, kov, keramika nebo sklo. Naskýtá se také možnost vytvářet složitější struktury. Mezi nevýhody řadíme například křehkost modelu a vysoké náklady spojené s pořízením a provozem tiskáren. [6] [9] [10]



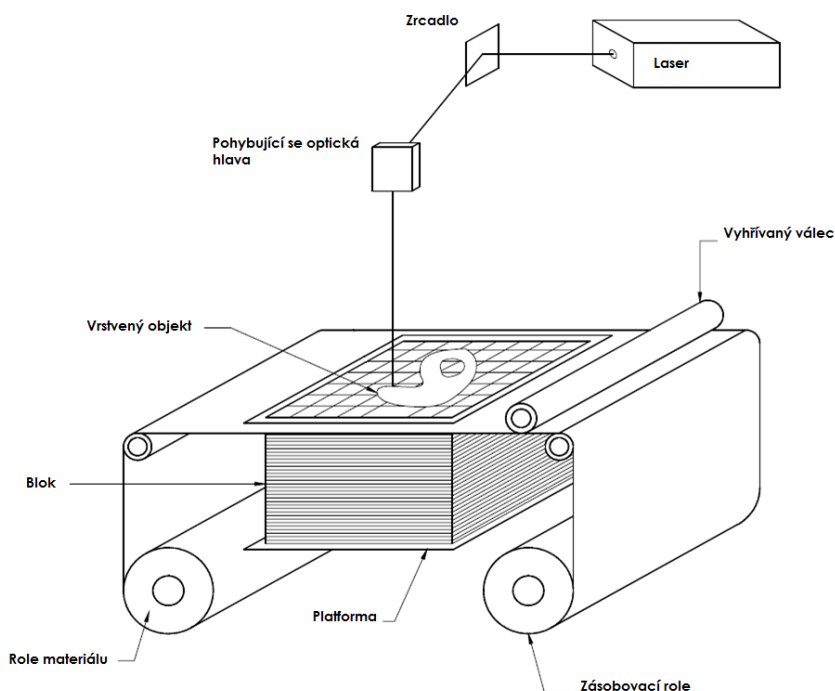
Obr. č. 4 SLS technologie, převzato z [11]

LOM (Laminated Object Manufacturing)

V poslední době tato metoda stále narůstá na popularitě, hlavně díky své finanční dostupnosti. Princip tisku spočívá ve vyřezávání a lepení vrstev objektu. Jako stavební materiál se většinou využívá papír nebo fólie. Princip této technologie spočívá ve vyříznutí tvaru každé vrstvy do folie, na kterou je pak nutno nanést vrstvu lepidla. Následuje pak podání nové vrstvy ze zásobníku nebo role. Jednotlivé vrstvení a následné lepení pak pokračuje, až do vytvoření požadovaného objektu.

Naskytá se zde otázka, zdali je vůbec možné považovat tuto technologii za 3D tisk, vzhledem k tomu, že se objekt netiskne, ale vyřezává. Vzhledem k tomu, že se jedná o aditivní technologii (materiál je postupně přidáván z rolí nebo zásobníků), můžeme zde tuto technologii zařadit.

Výhodou této technologie je již zmíněná cena, jednoduchost a přesnost. Nevýhodou je ovšem velký odpad, který vzniká vyřezáváním jednotlivých vrstev, jedná se o zhruba 50 % odpadu. [12] [13]



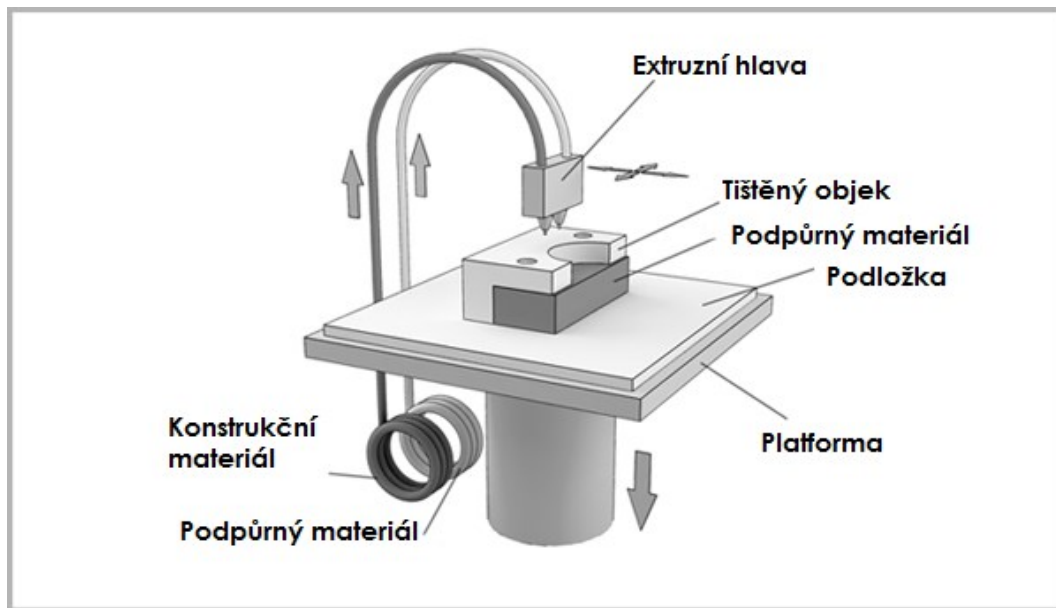
Obr. č. 5 LOM technologie, převzato z [14]

1.5 FDM technologie (Fused deposition Modeling)

FDM metoda patří mezi jednu z nejpoužívanějších a nejrozšířenějších technologií, uplatňujících se v 3D tisku. Princip této technologie spočívá v natavování termoplastu nebo kovu.

Využívají se zde dva druhy materiálů, prvním je materiál konstrukční, který představuje vyhotovený produkt. Mezi nejpoužívanější materiály (termoplasty) patří například ABS nebo PLA. Dnes jsou také velmi populární materiály typu Ultem, což jsou speciální termoplasty, pro jejichž tisk je však nutné vlastnit výkonnější tiskárny. Druhý materiál je materiál podpůrný, představující jakousi podpěru pro konstrukční materiál. Podpůrný materiál je po ukončení tisku odstraněn.

Tavený materiál je ve formě vlákna/drátu, který je namotán na cívku a vtlačován do vyhřívané trysky, pomocí podávacího systému. V této trysce se materiál ohřeje na příslušnou teplotu, vždy však o 1 °C vyšší, než je jeho teplota tavení. Vzniklá tavenina je pak tryskou vytlačována do pracovního prostoru (podložky), kde se pomocí extruzní hlavy, pohybující se v osách X a Y, postupně nanáší v tenkých vrstvách. Materiál začíná tuhnout ihned poté, co vyteče z trysky a naváže kontakt s podložkou. Po nanesení vrstvy se pracovní podložka sníží, a to o tloušťku, odpovídající nanesené vrstvě. Takto celý proces pokračuje, až do úplného zhotovení požadovaného objektu. Délka samotného tisku je závislá na rozměrech a složitosti výtisků, může dosahovat až desítek hodin.



Obr. č. 6 FDM technologie, převzato z [15]

FDM metodou lze u výrobků dosáhnout velmi dobrých mechanických vlastností, díky čemuž lze tyto výrobky využít například jako mechanické součástky. Nespornou výhodou je také jednoduchost a vznik minimálního odpadu, který tvoří pouze již zmiňovaný podpůrný materiál. [16]



Obr. č. 7 Výtisk FDM technologií, převzato z [17]

Za nevýhody můžeme považovat například omezenou přesnost, ovlivněnou samotným materiálem a tryskou, ze které je materiál vytlačován. Je třeba také počítat se smrštěním výsledného produktu, ke kterému dochází při tuhnutí materiálu. Tento jev lze ale kompenzovat korekcemi v systému, připravujícím tisková data. [18] [19]

2 MECHANICKÉ VLASTNOSTI PLASTŮ A JEJICH ZKOUŠENÍ

Jak již zde bylo dříve zmíněno, nejpoužívanějšími materiály pro FDM metodu jsou polymerní materiály, které mají formu drátu, namotaného na cívce (viz. Obr. č.8). Tyto dráty jsou dostupné v různých průměrech (1,75 mm, 2,85 mm nebo 3 mm) a v mnoha případech si je můžeme vybrat z různobarevných provedení. Hmotnost jedné takové cívky se pak pohybuje okolo jednoho kilogramu.

Materiál má velký vliv na mechanické vlastnosti a celkové chování modelu, proto je třeba znát typické vlastnosti zvoleného materiálu. Zde si uvedeme pár zástupců polymerních materiálů, kterými se tato práce bude zabývat.



Obr. č. 8 Polymerní materiál ve formě drátu, namotán na cívce, převzato z [20]

2.1 ABS (Akrylonitrilbutadienstyren)

ABS je jeden z nejpoužívanějších a nejpoužívanějších materiálů, využívajících pro tisk FDM technologií. Jedná se o termoplast, odolný proti chemikáliím, vysokým i nízkým teplotám a jeho hlavními výhodami jsou tuhost, nízká závislost na přesnosti nastavení extruzní hlavy a poměrně dobrá odolnost vytisknutých objektů. Na druhou stranu je tento materiál nevhodný pro tisk objektu, jehož určitý rozměr přesahuje délku 80 mm. Nevýhodou je také vyšší míra vylučování nebezpečných látek při tisku. Hustota materiálu je 1045 kg/m³. [21]

2.2 PLA (Polylactid acid)

Jedná se o druhý nejpoužívanější a nejuniverzálnější materiál, hned za již zmíněným ABS pro FDM technologii a 3D tisk obecně. PLA je termoplastický polyester, který je získáván z obnovitelných zdrojů jako je například bramborový nebo kukuřičný škrob. Tento materiál je na rozdíl od ABS méně náchylný k deformacím a disponuje dobrou pevností, a to i za nižších teplot. Při tisku PLA není až tak znatelný zápach připomínající pálení plastů, jako tomu je například u ABS. Za nevýhody můžeme považovat například menší odolnost vůči vyšším teplotám (měknutí začíná probíhat již při 60 °C), s čímž souvisí strojní broušení, které se u tohoto materiálu nedoporučuje, protože je materiál při tomto procesu rychle zahříván až do bodu, kdy začíná měknout (tomuto problému lze předejít chlazením). PLA je také méně pružný oproti ABS. [22]

2.3 PC (Polykarbonát)

Opět se jedná o termoplast, často využívaný v 3D tisku. Je také jeden z nejtvrdějších materiálů s dobrou teplotní, rázovou odolností a silnou adhezí mezi vrstvami, proto z něj můžeme tisknout houževnaté a pevné díly. Zachovává si svou rozměrovou stabilitu, až do teploty 110 °C. Své uplatnění proto často nachází ve výrobě prototypů, koncových součástech a nástrojích. [23]

2.4 PET (Polyetyléntereftalát)

Za svou známost vděčí tento termoplast plastovým láhvím, známým taky jako tzv PET láhve, se kterým se setkáváme dnes a denně. Známe ho také z potravinového průmyslu, kde se využívá hlavně na obaly a nádoby potravin. Díky své odolnosti proti otřesu a tvrdosti je PET vhodný pro výrobu lehkých předmětů. V základním stavu jde o bezbarvý materiál, u kterého se ovšem po ochlazení nebo zahřátí mění jeho transparentnost. Vyznačuje se také dobrou teplotní stálostí a malému kroucení při tisku, je z něj tedy vhodné tisknout objekty dosahující větších rozměrů. [24]

2.5 Nylon (Polyamid)

Velmi odolný materiál s vysokým poměrem pevnosti ku hmotnosti. Disponuje vynikající adhezi mezi vrstvami a vysoká teplotní odolnost spolu s nízkým součinitelem tření, umožňují výrobu funkčních a technických dílů z tohoto materiálu. Nevýhodou nylonu je, že je velmi hygroskopický, znamená to tedy že dokáže poměrně rychle absorbovat vodu ze vzduchu. Pokud se tak stane, mohou pak na materiálu vznikat bublinky, což je pro nás nepříjemné. Je tedy nutností dbát na to, aby bylo vlákno nylonu při tisku suché. Toho můžeme docílit například tak, že budeme tento materiál skladovat v uzavřené nádobě, vybavené odvlhčovačem. Nylonem lze pak vytisknout lesklé objekty s hladkým povrchem. [25]

2.6 ASA (Akrylonitril-styren-akryl)

ASA je velmi kvalitní konstrukční materiál, představující jakousi alternativu k ABS. Stejně jako u mnoha materiálů se i zde jedná o termoplast. Oproti ABS má zvýšenou odolnost vůči povětrnostním vlivům a odolává také UV záření, hodí se tedy i pro venkovní aplikace. Hlavními výhodami jsou zejména odolnost proti teplotě, dobré mechanické vlastnosti a jednoduchost na zpracování. ASA umožňuje také tisk s velkými nároky na detaily, a to i pro objekty menších rozměrů. Výtisky z tohoto materiálu pak disponují nízkou hladinou žloutnutí, což se uplatní zejména v případech, kdy je dlouhodobě kladen důraz na vzhled výtisku. [26]

2.7 CPE HG100 (Kopolyester)

Chemicky a teplotně odolný kopolyester, vykazující dobrou rozměrovou stabilitu a tvrdost. Jde zde o vylepšený PET filament, umožňující snadný tisk funkčních prototypů a mechanických částí. Nevýhodou je nevhodnost využití v prostředí, kde by mohlo dojít do kontaktu s potravinami, vystavování venkovnímu prostředí po delší dobu nebo v prostředí, kde by na vytištěný objekt působily teploty vyšší než 70 °C. Samotný tisk pak oproti například ABS není doprovázen nepříjemným a zdraví škodlivým zápachem. [27]

2.8 HTPLA/ HD PLA (High temperature PLA)

Tento materiál je speciální modifikací klasického PLA. Zachovává si jeho kvalitu, jednoduchost tisku, přesnost, a navíc se chlubí vyšší odolností výtisků. HTPLA je vyztužen vlákny rostlinného původu, která mají za následek vyšší pevnost, přilnavost barev a dávají povrchu matnost. Specialitou tohoto materiálu je možnost dosažení lepších vlastností, prostřednictvím následné tepelné úpravy. Ta se může uskutečnit v běžné troubě tzv. „zapečením“ výtisku. Tímto procesem docílíme nárůst teplotní odolnosti na 120°C. Nevýhodou HTPLA je rozpustnost v chemikáliích a případná absorpce vlhkosti z ovzduší, která vede k následné degradaci materiálu. [28]

Názorná ukázka celého procesu zapečení HD PLA materiálu je popsána v praktické části této bakalářské práce.

2.9 PP (Polypropylen)

Polypropylen je obecně jeden z nejpoužívanějších plastů na planetě. Je trvanlivý, vysoce houževnatý materiál s vynikající odolností proti únavě. Zachovává si tvar po ohybu nebo protažení. Pyšní se také dobrou teplotní (až do 105°C), elektrickou (má vysoký elektrický odpor) a chemickou odolností (odolává vůči zásadám, průmyslovým přípravkům na čištění a kyselinám). Vhodný je například ke tvorbě prototypů, laboratorního vybavení, ochranných krytů a koncových součástech. Díky své nízké hustotě dosahují výtisky nízkých hmotností, vyznačují se vysokým poměrem pevnosti k hmotnosti. Nemá ovšem schopnost odolávat dlouhodobému působení UV záření. [29]

2.10 Mechanické vlastnosti a charakteristiky polymerů

Mechanické vlastnosti polymerů

Vyjadřují chování materiálu při mechanickém namáhání, které způsobuje deformaci nebo porušení. Rozlišujeme 4 základní mechanické vlastnosti, pružnost a plasticitu pro deformaci materiálu, pevnost a houževnatost v souvislosti s porušením materiálu.

Pružnost neboli elasticita je schopnost materiálu, vykazovat pružnou deformaci pod účinkem vnějších sil, projevující se zpravidla změnou objemu. Jedná se zde o elastickou deformaci, kdy je změna objemová změna vratná (po ukončení mechanického namáhání se objem vrací do původních hodnot). V případech, že se materiál nevrátí do původního stavu a změní svůj tvar, mluvíme zde o plastické (nevratné) deformaci, tedy plasticitě. Tato deformace je doprovázena pouze změnou tvaru, nikoli objemu.

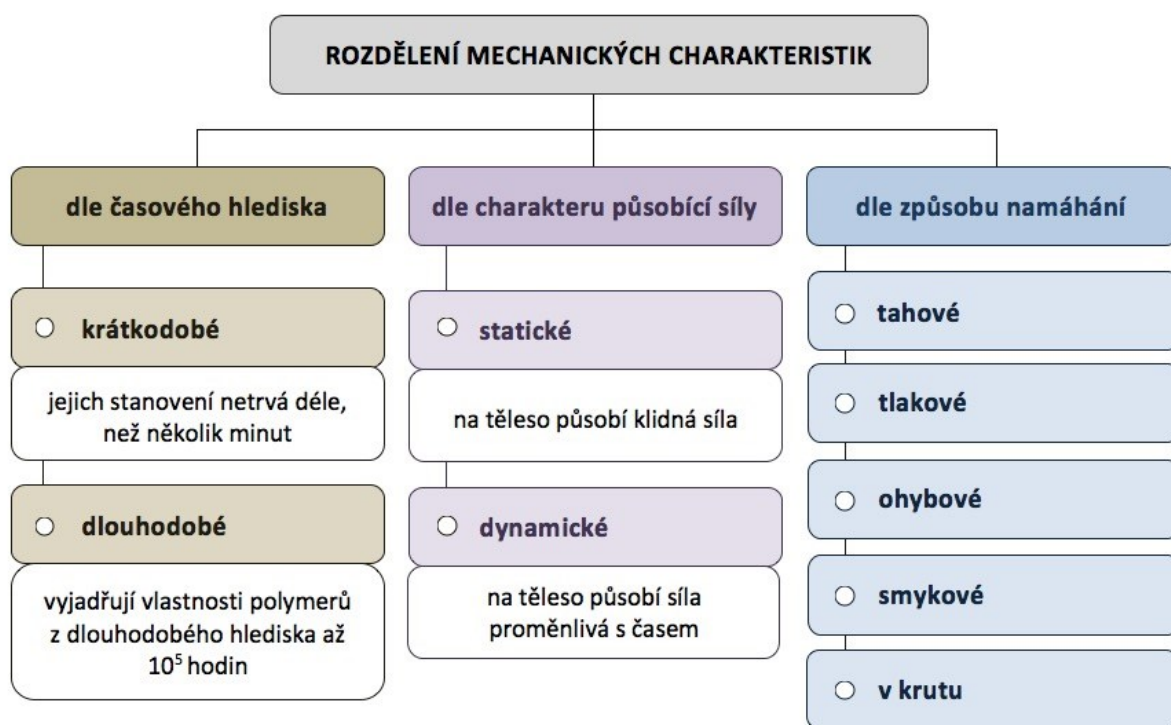
Pevnost je odolnost materiálu vůči trvalému porušení. Příkladem trvalého porušení je šíření trhlin, které mají za výsledek vznik lomu. Vyjadřuje tedy míru mezního zatížení, které je materiál schopen přenést. Houževnatost je materiálová vlastnost, určující schopnost materiálu absorbovat energii před dosažením mezního stavu. Opakem houževnatosti je křehkost. Vyjádřením houževnatosti bývá pak mechanická práce spojená s porušením materiálu. [30] [31]

Mechanické charakteristiky polymerů

Mechanické charakteristiky jsou veličiny, uváděné v materiálových listech, které jsou zpravidla experimentálně stanoveny. Pro jejich určení je zapotřebí vyrobit tzv. normalizované zkušební těleso, zhotovené dle předepsaných podmínek. Výsledné veličiny pak závisí hlavně na tvaru tohoto tělesa, přípravě tělesa a podmínkách zkoušky.

Rozdělení mechanických charakteristik dělíme do třech skupin. První skupinou je rozdělení dle časového hlediska, kde rozlišujeme krátkodobé a dlouhodobé stanovení. Ve druhé skupině se charakteristiky dělí, dle charakteru působící síly, a to na statické, kdy na těleso působí kladná síla a na dynamické, kdy je síla proměnlivá s časem. Pro nás nejdůležitější bude třetí skupina dělení, kdy je hlavním faktorem způsob namáhání. Rozlišujeme tak tahové,

tlakové, ohybové, smykové a namáhání v krutu. Pro lepší přehlednost poslouží obrázek č.9. [30] [31]



Obr. č. 9 Rozdělení mech. charakteristik, převzato z [32]

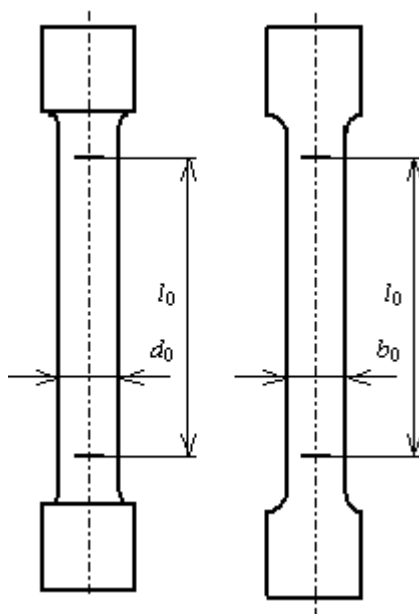
V této bakalářské práci bude pro vyhodnocení a porovnání mechanických vlastností využito zkoušky tahem (dle normy ČSN EN ISO 527-1). [33]

2.11 Zkouška tahem

Je jednou ze základních zkoušek, využívající se k určování mechanické charakteristiky pro určení jakosti materiálu. Zařízení, na kterém se provádí tahová zkouška se nazývá trhací stroj. Zkušební vzorek s danými rozměry, určeným pro tahovou zkoušku podle normy (ČSN EN ISO 527-1) se upne do čelistí trhacího stroje a po následném přetržení na dvě části se stanoví požadované mechanické vlastnosti. [30]

2.11.1 Průběh tahové zkoušky

Zkušební těleso, jehož tvar a rozměry jsou definovány normou je upnuto do čelistí trhacího stroje. Těleso bývá nejčastěji ve tvaru oboustranných lopatek (viz. Obr. č. 10), který zaručuje pevné uchycení v čelistech trhacího stroje a klade důraz na koncentraci napětí do zúžené části vzorku. Před samotnou zkouškou je nutné vzorek změřit a naměřené hodnoty pak zadat do určeného programu.



Obr. č. 10 Vzorek pro tahovou zkoušku, převzato z [34]

Po upnutí do čelistí je vzorek vystavován jednoosému namáhání v tahu, až do úplného přetržení vzorku. Důležitou roli hraje také rychlost prodlužování, kterou je třeba před začátkem operace nastavit, udává se v milimetrech za minutu (mm/min). Výstupním parametrem je pak graf, na kterém je znázorněna deformační křivka, závislá na napětí a deformaci.

Z deformační křivky pak určujeme různé mechanické charakteristiky. [30] [35]

2.11.2 Mechanické charakteristiky

Mez pevnosti (R_m)

Mluvíme zde o smluvním napětí, odpovídajícímu největší síle (F_{max}), která byla naměřena v průběhu tahové zkoušky. [36]

Rovnice:

$$R_m = \frac{F_{max}}{S_0} \quad [\text{MPa}] \quad (1)$$

R_m – mez pevnosti v tahu [MPa]

F_{max} – maximální zatížení v tahu [N]

S_0 – počáteční průřez zkušebního tělesa [mm²]

Napětí na mezi kluzu (R_e)

Označujeme ho za horní hranici přípustného napětí, při jejíž překročení se z elastické deformace stává deformace plastická, vznikají tedy trvalé deformace. [36]

Rovnice:

$$R_e = \frac{F_e}{S_0} \quad [\text{MPa}] \quad (2)$$

R_e – napětí na mezi kluzu [MPa]

F_e – zatížení [N]

S_0 – počáteční průřez zkušebního tělesa [mm²]

Kontrakce (Z)

Trvalé zmenšení průřezu po přetržení vzorku (v místě vzniklého lomu). Údaj je vyjádřen v procentech. [36]

Rovnice:

$$Z = \frac{\Delta S}{S_0} * 100 [\%], Z = \frac{S_1 - S_0}{S_0} * 100 [\%] \quad (3)$$

Z – kontrakce [%]

ΔS – rozdíl počátečního a vzniklého průřezů [mm²], lze také vyjádřit jako $\Delta S = S_1 - S_0$

S_0 – počáteční průřez zkušebního tělesa [mm²]

S_1 – konečná průřez zkušebního tělesa [mm²]

Poměrné prodloužení (A) (tažnost)

Vyjadřuje podélnou deformaci (%). [36]

Rovnice:

$$A = \frac{\Delta L}{L_0} * 100 [\%], A = \frac{L_1 - L_0}{L_0} * 100 [\%] \quad (4)$$

A – tažnost (relativní prodloužení) [%]

ΔL – absolutní prodloužení [N], lze také vyjádřit jako $\Delta L = L_1 - L_0$

L_0 – počáteční délka zkušebního tělesa [mm²]

L_1 – konečná délka zkušebního tělesa [mm²]

Modul pružnosti (E)

Modul pružnosti je mechanická charakteristika, vyjadřující tuhost materiálu. Čím vyšší je modul pružnosti, tím je daný materiál tužší. Jedná se o závislost napětí (σ) na relativním prodloužení (ε), kterou vyjadřuje Hookův zákon (5).

Bod, ve kterém končí platnost hookova zákonu, označujeme jako mez úměrnosti (obr. č. 11). Bod, do kterého je deformace vratná se nazývá mez pevnosti, za touto mezí nastává plastická (nevratná) deformace.

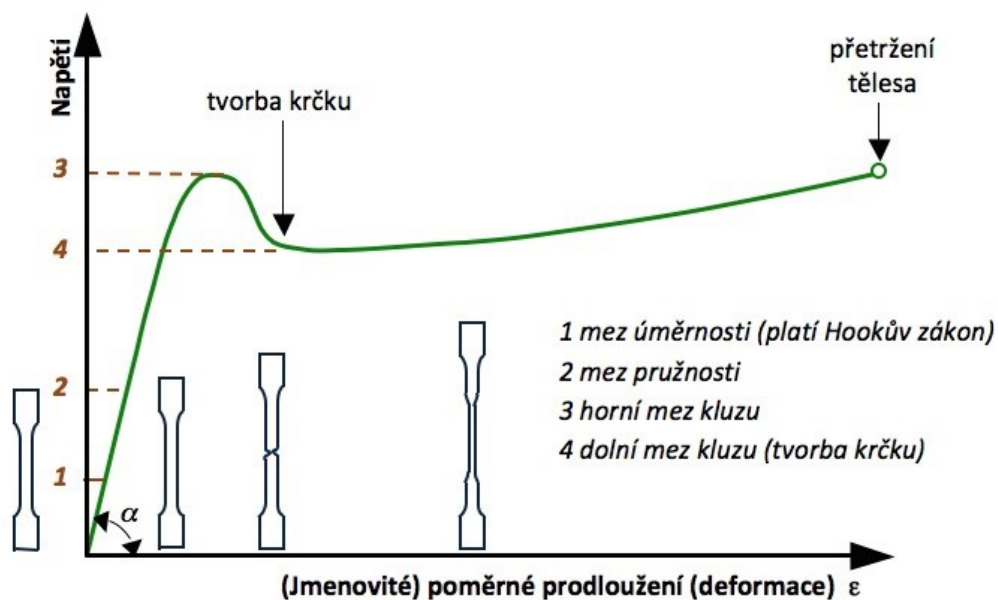
Rovnice (Hookův zákon):

$$\sigma = E * \varepsilon \rightarrow E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \text{ [MPa]} \quad (5)$$

E – modul pružnosti [MPa]

ε – tažnost (relativní prodloužení) [mm]

σ – napětí [MPa]



Obr. č. 11 Prodloužení, převzato z [37]

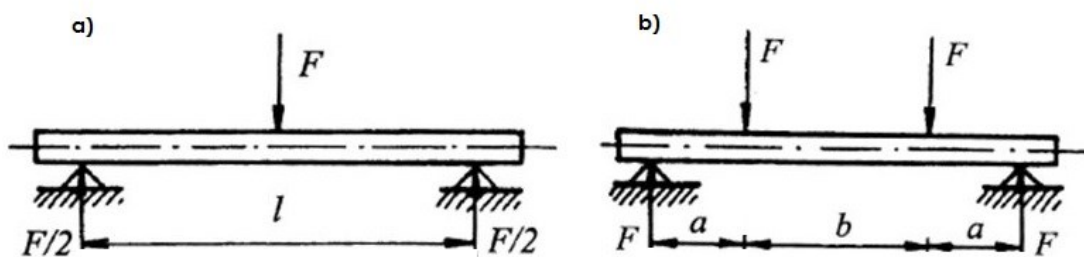
2.12 Statická zkouška v ohybu

Tento druh statické zkoušky je vhodný především pro křehké materiály, které se mají tendenci porušit už při malém ohybu, je definován normou ČSN EN ISO 178. Dále je tento druh zkoušek využíván především k určení pevnosti materiálu v ohybu a také modulu pružnosti, přičemž by se výsledky této zkoušky měly lišit od výsledků tahové zkoušky.

Spousta polymerních dílu je ohybově namáhána (laminátové konstrukce, různé nosníky atd.), důležité je tedy znát ohybové vlastnosti daného materiálu. [30] [38]

2.12.1 Průběh zkoušky

Pro tento typ zkoušky jsou využívány zkušební vzorky ve tvaru hranolu, definovány normou. Tento vzorek je umístěn na podpěry, který jsou od sebe v předem dané vzdálenosti (l). Jedná-li se o tříbodový ohyb, je na střed takto umístěného vzorku vyvíjena síla (F), která působí až do úplného selhání vzorku (viz obr. 12 a). Pro čtyřbodový ohyb není pouze jedno kontaktní místo jako u tříbodového ohybu, ale dva, do kterých je působící síla (F) rovnoměrně rozdělena na dvě stejně velké síly, působící v určené vzdálenosti od podpěr (viz obr. 12 b). Čtyřbodový ohyb je pak nejčastěji využíván pro tlustostěnné vzorky, velkých rozměrů. [30]



Obr. č. 12 a) tříbodový ohyb, b) čtyřbodový ohyb, převzato z [39]

2.12.2 Mechanické charakteristiky

Pevnost v ohybu (σ_{fM})

Definována jako maximální ohybový moment ($M_{o,max}$) na průřezový modul (W_0). [30]

Rovnice:

$$\sigma_{fM} = \frac{M_{o,max}}{W_0} \quad [\text{MPa}] \quad (6)$$

σ_{fM} – pevnost v ohybu [MPa]

$M_{o,max}$ – ohybový moment [N*mm]

W_0 – průřezový modul [mm³]

Rovnice pro výpočet ohybového momentu:

Pro třibodový ohyb:

$$M_{o,max} = \frac{F_{max} * L}{4} \quad [\text{N*mm}] \quad (7)$$

Pro čtyřbodový ohyb:

$$M_{o,max} = F_{max} * L_a \quad [\text{N*mm}] \quad (8)$$

F_{max} – maximální síla (F), která je na vzorek vyvíjena [N]

L – vzdálenost mezi podpěrami [mm]

L_a – vzdálenost mezi podpěrou a působící silou (F), (viz obr. č. 12 b) [mm]

Průřezový modul (W_0)

Je vypočítán z rozměrů zkušebního tělesa, jedná se o hranol o délce (l), šířce (b) a výšce (h). [30]

Rovnice:

$$W_0 = \frac{b \cdot h^2}{6} [\text{mm}^3] \quad (9)$$

W_0 – průřezový modul [mm^3]

b – šířka zkušebního vzorku [mm]

h – výška zkušebního vzorku [mm]

Modul pružnosti v ohybu (E_f)

Podobný jako modul pružnosti v tahu, také se vypočítá ze dvou napětí, odpovídajícím hodnotám deformace ohybem. [30]

Rovnice:

$$E_f = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\epsilon_2 - \epsilon_1} [\text{MPa}] \quad (10)$$

E_f – modul pružnosti v ohybu [Mpa]

ϵ_1 – hodnota deformace ohybem [0,05 %]

ϵ_2 – hodnota deformace ohybem [0,25 %]

σ_1, σ_2 – napětí, odpovídající hodnotám deformace ohybem [Mpa]

Průhyb (s)

Průhyb (s) vyjadřuje celkovou hodnotu, o kterou byl vzorek ohnut. [30]

Rovnice:

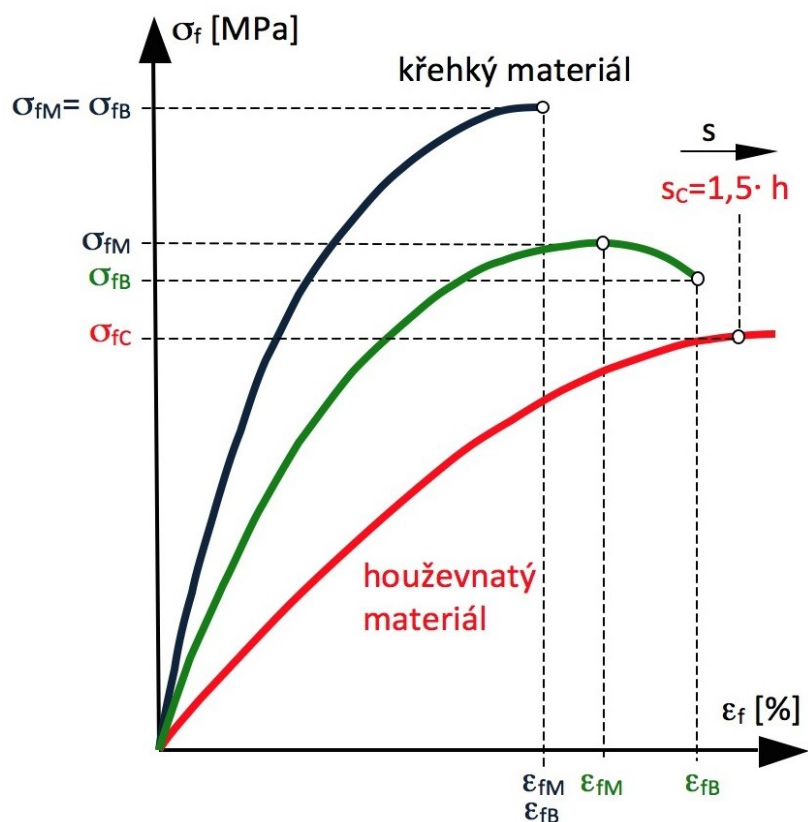
$$s = \frac{1}{6} * \frac{\varepsilon_f * L^2}{h} [\text{mm}] \quad (11)$$

s – průhyb vzorku [mm]

ε_f – deformace v ohybu [Mpa]

L – vzdálenost mezi podpěrami [mm]

h – výška zkušebního vzorku [mm]



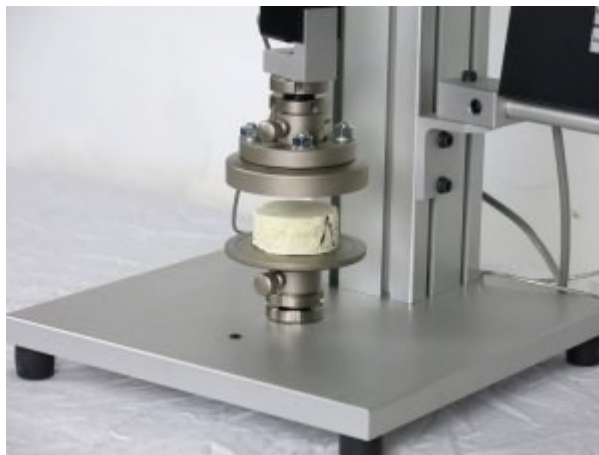
Obr. č. 13 deformační křivka polymeru v ohybu, převzato z [40]

2.13 Zkouška tlakem

Cílem tohoto testu je určení chování nebo odezvy materiálu při tlakovém zatížení. Měří se zde základní proměnné hodnoty jako napětí (σ) a deformace (ϵ). Z těchto veličin můžeme pak určit mez pevnosti v tlaku (σ_M), mez kluzu (σ_Y) a modul pružnosti (E). [30]

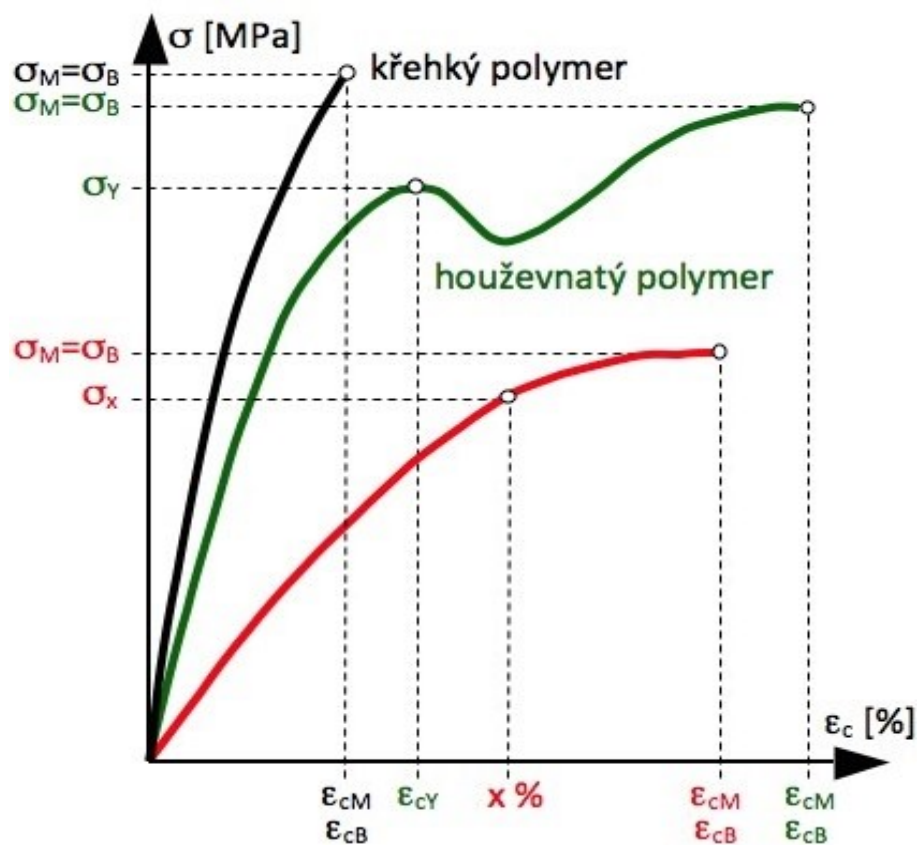
2.13.1 Průběh tlakové zkoušky

Tato zkouška spočívá v jednoosém působení tlakové síly na vzorek. Tento zkušební vzorek je obvykle ve tvaru trubky, válce nebo kolečka. Průběh tlakové zkoušky je následující: příslušný vzorek je umístěn mezi dvě tlačné desky, které rozdělují aplikovaná zatížení po celé ploše obou stran zkušebního vzorku. Poté začnou tyto desky, prostřednictvím zkušebního stroje tlačít na vzorek, kdy je během působení tohoto tlaku vyhodnocován graf závislosti napětí na poměrném stlačení (viz obr. č. 15). Stlačený vzorek se obvykle zkracuje, a to ve směru, ve kterém na ně působily tlakové síly (tedy osa Z). Naopak nabývá svých rozměrových hodnot v osách X a Y, rozšiřuje se tedy ve směru kolmém na působící tlakové síly. Jakmile dosáhne vzorek své meze pevnosti, dochází u něj k porušení, nejčastěji ve formě trhlin.



Obr. č. 14 umístění vzorku ve zkušebním stroji, převzato z [41]

Vyhodnocení mechanických charakteristik jsou pak obdobné jako například u tahové zkoušky (rozdíl je však v indexech, u tahové zkoušky jsou malými písmeny (σ_m), u tlakové velkými (σ_M)). [42]



Obr. č. 15 graf tlakové zkoušky (závislost napětí na poměrném stlačení), převzato z [30]

3 NÁVRH VZORKŮ PRO ZKOUŠENÍ

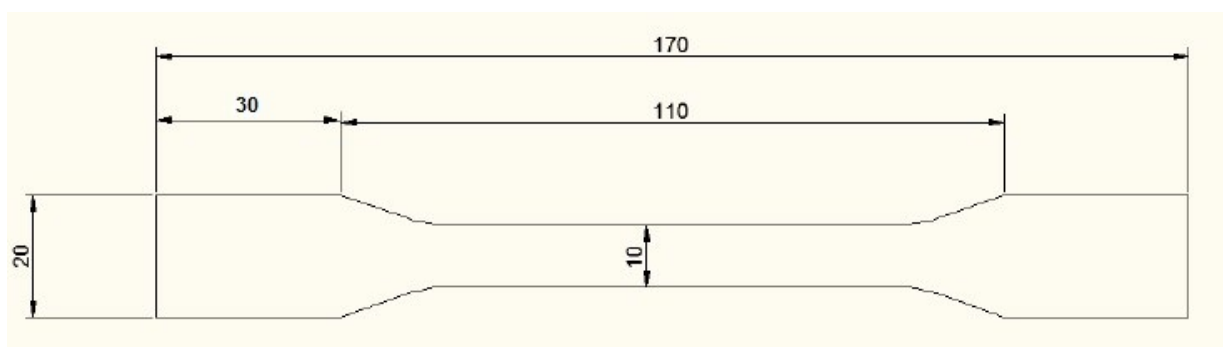
Na začátku praktické části této bakalářské práce bylo nutno vybrat materiály, na kterých se budou testovat mechanické vlastnosti, a to prostřednictvím tahové zkoušky. Bylo zvoleno sedm materiálu (viz. Tabulka č.2), z čehož jeden z nich prošel žíhací úpravou (viz. Žíhání HD PLA).

Dalším krokem byl výběr tiskového parametru, kterým se od sebe budou vzorky jednotlivých materiálů lišit. Proměnným parametrem byla zvolena výška nanášené vrstvy (Primary Layer Height), která byla nastavena na 0.1, 0.2 a 0.3 mm, označení jednotlivých vzorků s danou vrstvou najdeme v tabulce č. 3.

Aby byl tisk možný, musel se vytvořit 3D model vzorku ve vhodném softwaru. Pro tento konkrétní tisk byl využit CAD software, ze kterého se pak vytvořený model převedl do formátu (.STL), který přečte software využívané 3D tiskárny. V našem případě to byl software Simplify 3D. Po splnění těchto kroků, mohlo dojít k tisku.

3.1 Návrh modelu pro tahovou zkoušku

Pro tahovou zkoušku byl navrhnut model, odpovídající normě ISO 527. Přesné rozměry modelu pro tahovou zkoušku jsou vyobrazeny na obrázku č. 16. [33]



Obr. č. 16 vzorek tahové zkoušky

3.2 Tisk vzorků

Tisk se prováděl na tiskárně typu Prusa I3 MK2 viz. Obr.17, jejíž parametry jsou uvedeny v tabulce č.1.

Tab. č. 1 Parametry tiskárny

Parametry tiskárny	
Pracovní prostor	250 x 210 x200 mm
Průměr trysky	0,4 mm
Tisková struna	1,75 mm
Výška vrstvy	od 0,05 mm
Vyhřívaná podložka	Ano
Rychlost tisku	200 mm/s
Připojení	SD karta, USB



Obr. č. 17 Prusa MK 2, převzato z [43]

Tato tiskárna je vhodná k tisku technologií FDM. V programu Simplify 3D byl vytvořen G- code, který se za pomoci SD karty přenesl do samotné tiskárny.

Nyní něco o vybavení tiskárny. Motor extruderu je uchycen na rámu tiskárny. V našem případě je tiskárna vybavena čtyřmi takto umístěnými motory, které umožňují například tisk více materiálů zároveň. Z každého motoru je do extruderu vyvedena teflonová hadička, kterou prochází používaný materiál. Přepínání motorů je možné na ovládací desce tiskárny.

Tiskárna je také vybavena vyhřívanou podložkou, která má schopnost udržet všechny používané tavné struny bez nutnosti jakýchkoliv přípravků. Konstrukce této podložky je také udělaná tak, aby nedocházelo k přichycení tištěných objektů na podložku.

Pro tahovou zkoušku bylo použito celkem 7 různých materiálů, z čehož jeden prošel žíhací úpravou. Byly to materiály PLA, ASA, ABS, PET, CPE HG 100, HD PLA a HD PLA žíhané. U každého materiálu byly zvoleny celkem 3 hodnoty výšky nanášené vrstvy, konkrétně 0.1, 0.2 a 0.3 mm. Jeden materiál tedy obsahoval 3 sady vzorků, přičemž každá sada obsahovala tři vzorky.

Pro lepší přehlednost byla vyhotovena tabulka č. 2, obsahující přehled všech testovaných materiálů s teplotami pro tisk každého z nich a tabulka č. 3, ve které jsou uvedené hodnoty výšky nanášené vrstvy pro danou sadu vzorků a označení těchto sad.

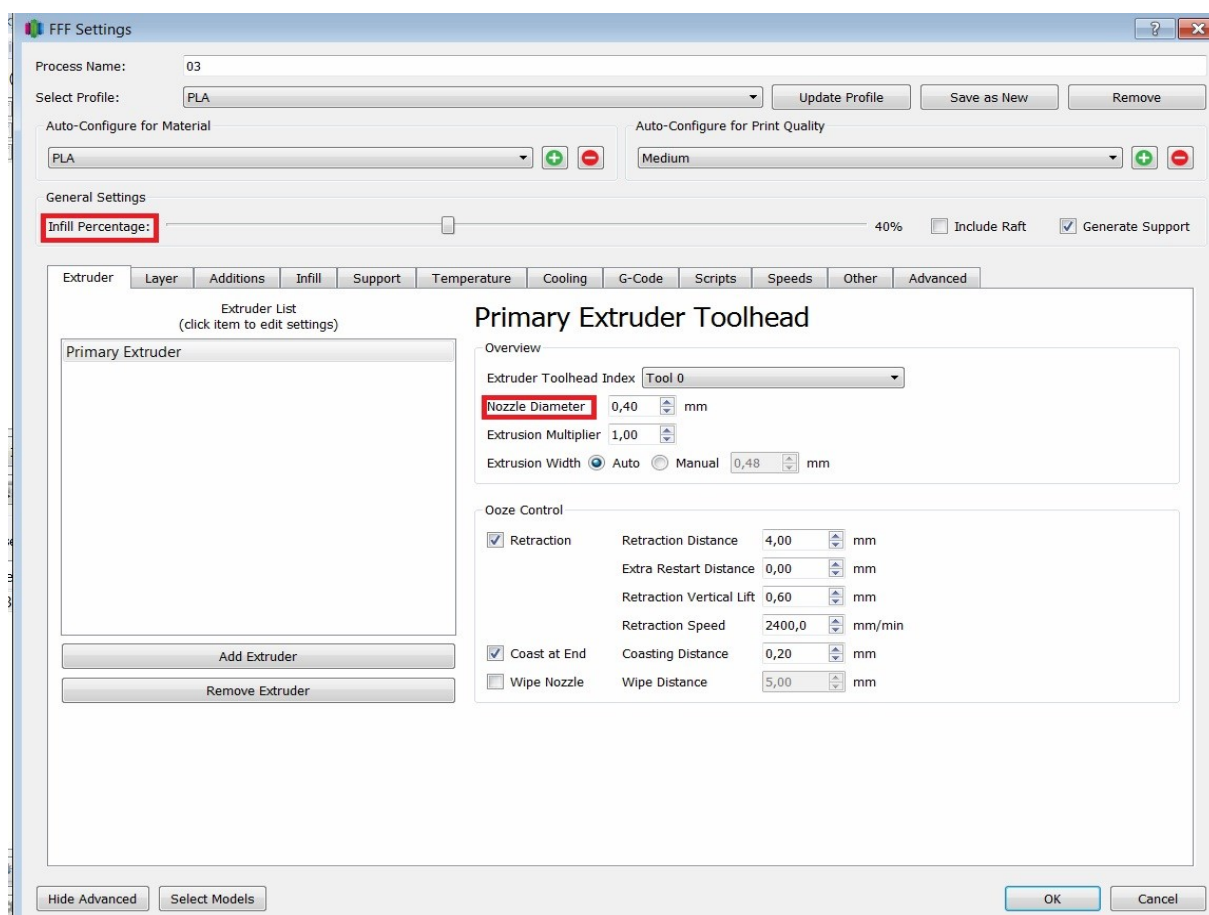
Tab. č. 2 Přehled teplot materiálů

Název materiálu	Teplota extruderu [°C]	Teplota podložky[°C]
ABS	250	75
PLA	200	není nutná / 20 - 60
PET	240	75
ASA	250	80
CPE HG100	255 - 275	70 - 80
HD PLA	200 - 220	50 - 70
HD PLA Ž.	200 - 220	50 - 70

Tab. č. 3 Označení Materiálů

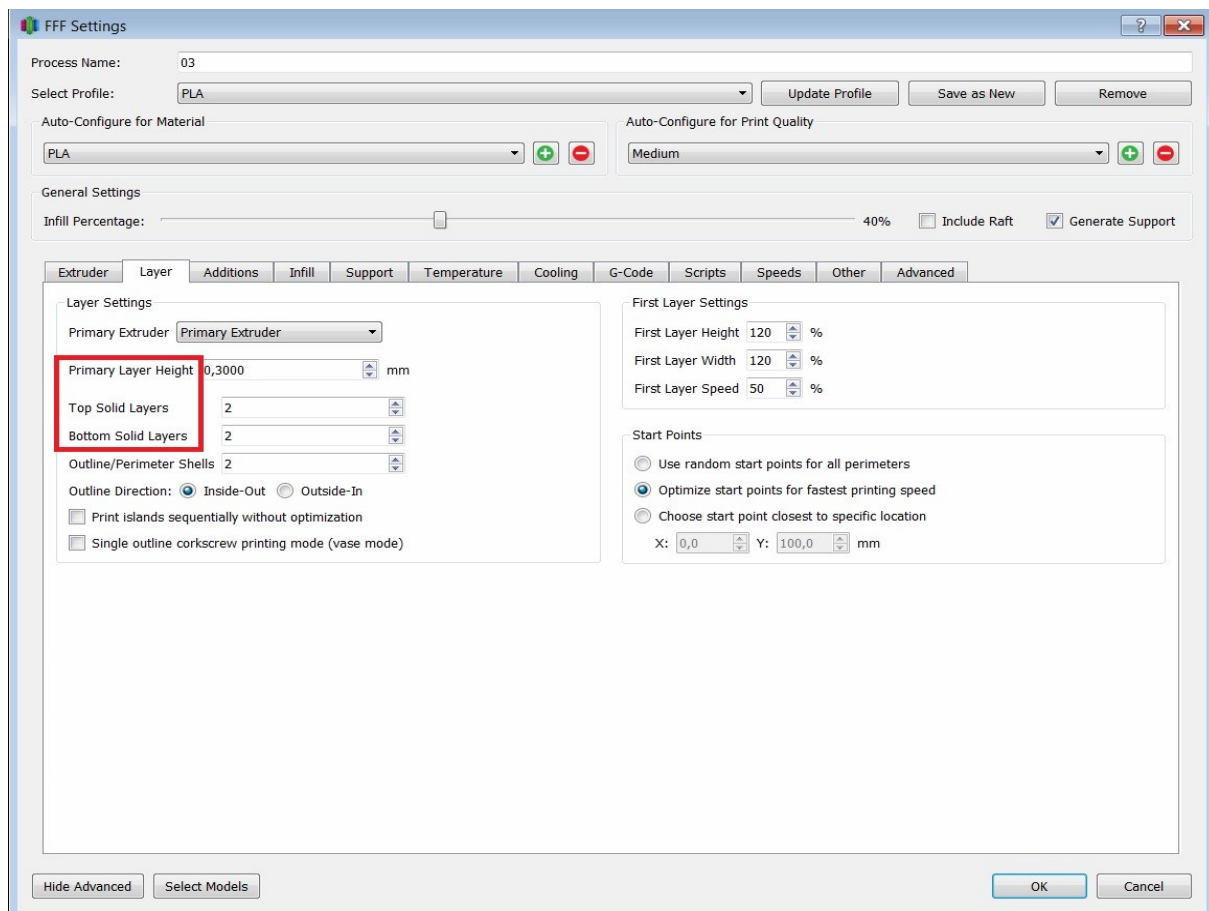
Materiál	Vrstva 0.1 mm	Vrstva 0.2	Vrstva 0.3 mm
PLA	PLA 1.1 PLA 1.2 PLA 1.3	PLA 2.1 PLA 2.2 PLA 2.3	PLA 3.1 PLA 3.2 PLA 3.3
ASA	ASA 1.1 ASA 1.2 ASA 1.3	ASA 2.1 ASA 2.2 ASA 2.3	ASA 3.1 ASA 3.2 ASA 3.3
HD PLA	HD 1.1 HD 1.2 HD 1.3	HD 2.1 HD 2.2 HD 2.3	HD 3.1 HD 3.2 HD 3.3
CPE HG 100	CPE 1.1 CPE 1.2 CPE 1.3	CPE 2.1 CPE 2.2 CPE 2.3	CPE 3.1 CPE 3.2 CPE 3.3
HD PLA žíhané	HDŽ 1.1 HDŽ 1.2 HDŽ 1.3	HDŽ 2.1 HDŽ 2.2 HDŽ 2.3	HDŽ 3.1 HDŽ 3.2 HDŽ 3.3
ABS-T	ABS 1.1 ABS 1.2 ABS 1.3	ABS 2.1 ABS 2.2 ABS 2.3	ABS 3.1 ABS 3.2 ABS 3.3
PET	PET 1.1 PET 1.2 PET 1.3	PET 2.1 PET 2.2 PET 2.3	PET 3.1 PET 3.2 PET 3.3

Samotný tisk probíhal následovně: V softwaru SIMPLIFY 3D se nastavily jednotlivé parametry tisku. V záložce Extruder jsme nastavili procento výplně, které bylo pro všechny vzorky nastaveno na 40 %, a to za pomoci jezdce u kolonky Infill Percentage (viz obr. 18). Průměr trysky (Nozzle Diameter) byl nastaven na 0,40 mm.



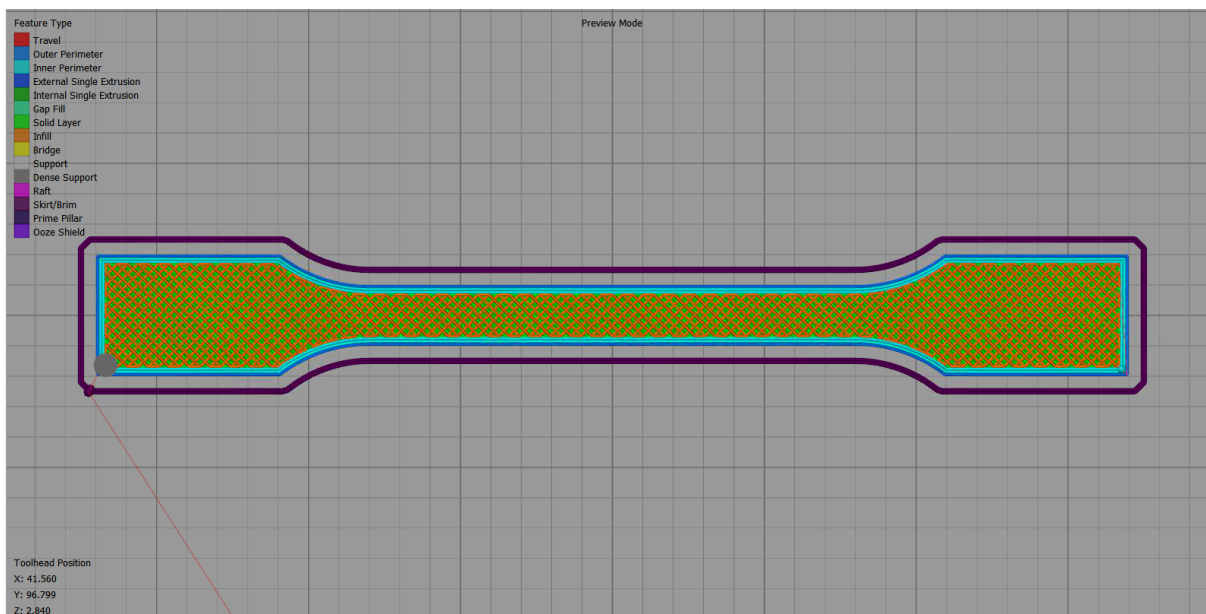
Obr. č. 18 Nastavení – Extruder

Poté se v záložce Layer nastavovala primární vrstva tisku (Primary Layer Height). V této práci hraje nastavení právě této vrstvy hlavní roli, v tomto případě se jednalo o vzorek s tloušťkou vrstvy 0,3mm. Top Solid Layers (horní pevná vrstva) a Bottom Solid Layers (dolní pevná vrstva) nám stanovují počet pevných vrstev tištěného objektu, v našem případě se jedná o dvě vrstvy, což představuje i minimální počet pro tisk. Nastavení všech těchto parametrů je znázorněno na obrázku č. 19.

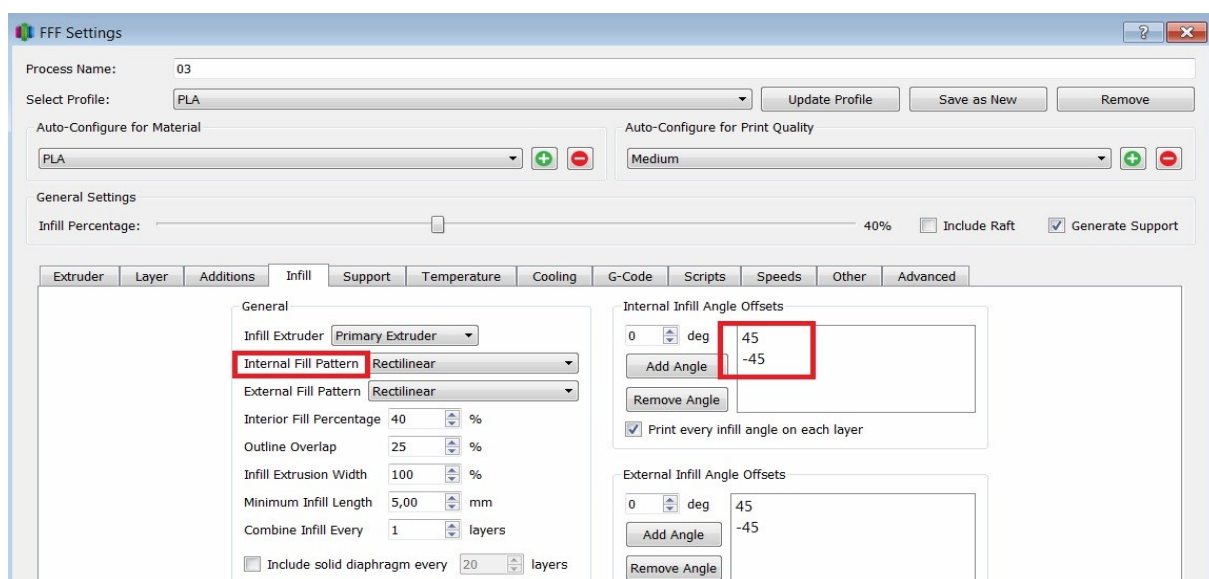


Obr. č. 19 Nastavení vrstev

Nastavení úhlu pro vnitřní vzor výplně byl ponechán na výchozí hodnotu, což je -45° a 45° . Díky tomuto nastavení vzniká tzv. mřížový vzor výplně (obr.č. 20). Vnitřní vzor představuje kolonka Internal Fill Pattern (viz obr č.21).

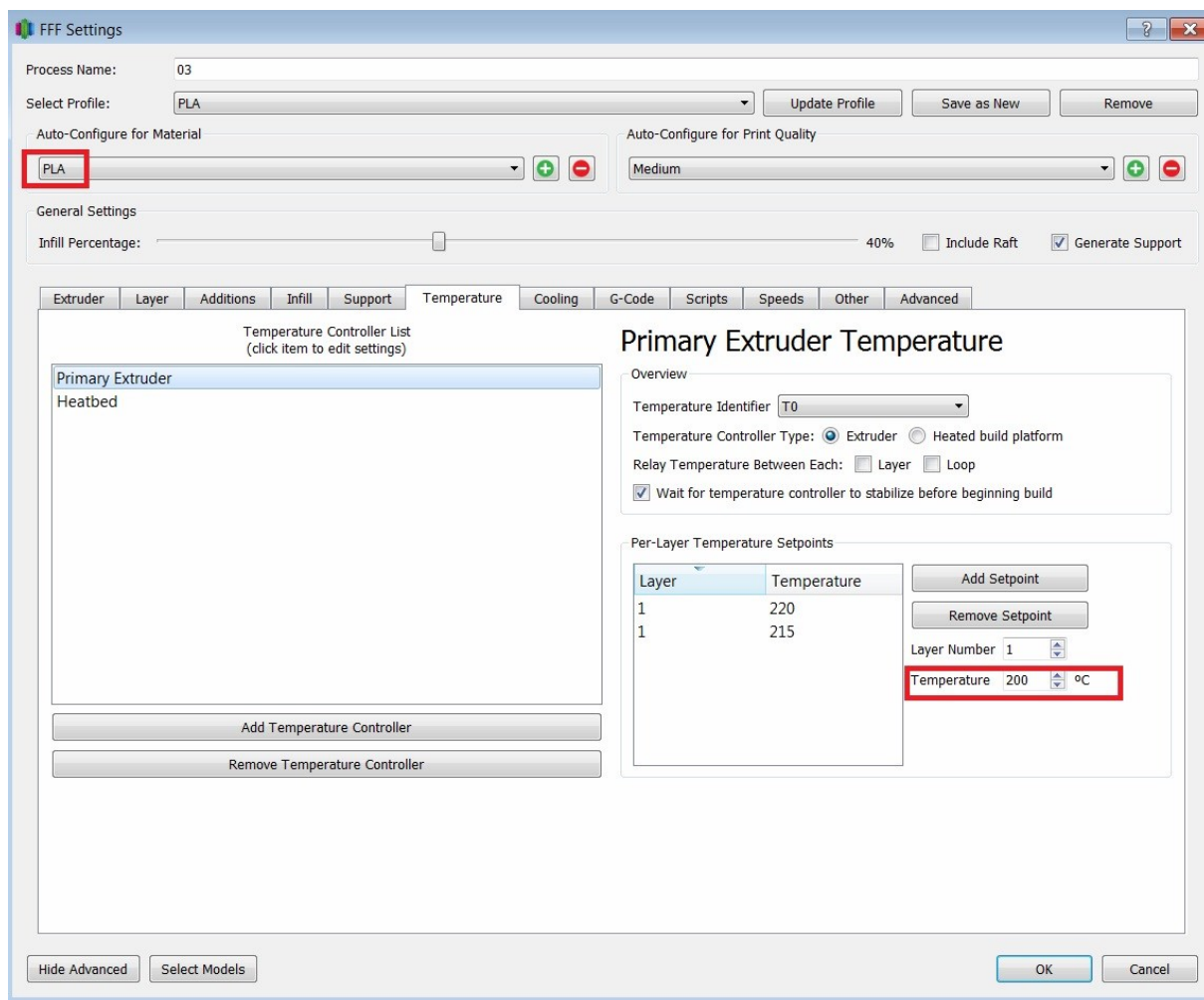


Obr. č. 20 Mřížový vzor výplně



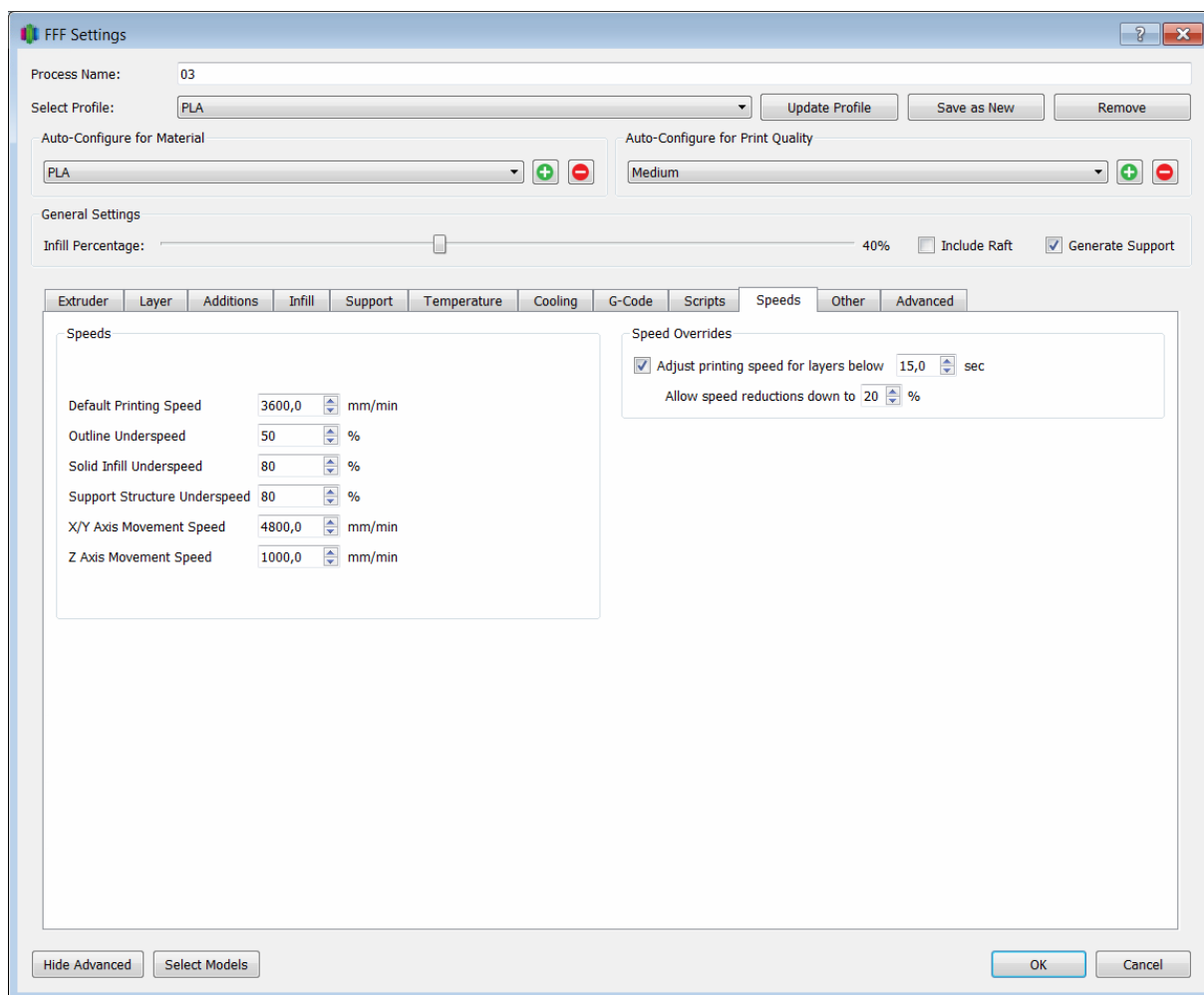
Obr. č. 21 Nastavení úhlu

Nastavení teploty tisku je jeden z nejdůležitějších parametrů a je závislý na daném typu materiálu. Na obrázku č. 22 můžeme vidět nastavení teploty tisku pro materiál PLA, pro který je teplota tisku 200°C. Teploty všech testovaných materiálů nalezneme v tabulce č.2.



Obr. č. 22 Nastavení teploty

Posledním důležitým parametrem je rychlost tisku (Default Printing Speed), která byla ponechána na původní hodnotu, a to sice na 3600 mm/min.



Obr. č. 23 Nastavení rychlosti

3.3 Žihání HD PLA

U jednoho z testovaných materiálů (HD PLA) uváděl výrobce možnost takzvaného vytvrzení, které by údajně mělo mít vliv na jeho mechanickou pevnost a teplotní odolnost. Na základě této možnosti jsme vytiskly dvě sady HD PLA. První sada bude klasické HD PLA bez vytvrzení (HD) a druhou sadu bude představovat vyžíhané HD PLA, námi označené jako HDŽ.

Žihání se provádělo v peci CLASIC, typ 3013L.



Obr. č. 24 Pec CLASIC 3013L

3.3.1 Pracovní postup

Před zahájením tohoto procesu bylo nutné nechat vzorky po vytisknutí vychladnout na pokojovou teplotu. Takto nachystané vzorky se vyskládaly na vhodnou a předem očištěnou podložku, která se spolu se vzorky umístila do komory pece, tak aby byla ve středu a rovnoměrně vzdálena od topných těles uvnitř pece. Nyní bylo nutné nastavit postupný ohřev trouby, až na teplotu 80 °C, která byla určena výrobcem pro toto žíhání. Nastavení probíhalo na ovládacím panelu pece.

Po dosažení žíhací teploty bylo nutno vyčkat 15 minut, než bude celý proces hotový. Po celou dobu žíhání jsem kontroloval, zda li je teplota stále v normě. Teplotu bylo možné sledovat na digitálním displeji pece (viz obr. č.25)



Obr. č. 25 Displej pece

Po uplynutí patnácti minut se podložka se vzorky vyjmula z pece a umístila na vhodné místo, kde se ponechala, dokud vzorky nevychladly na pokojovou teplotu.

Celý žíhací proces se prováděl přesně podle pokynů, uváděných výrobcem materiálů HD PLA.

3.4 Tahová zkouška

Před začátkem tahové zkoušky bylo nutné změřit šířku (a) a tloušťku (b) vzorku, a to z důvodu přepočtu zatěžující síly na napětí. Vzorek se tak změřil na pěti různých místech, ze kterých se pak vypočítala průměrná hodnota jak pro šířku (a), tak pro tloušťku (b). Počáteční měřená délka L_0 byla nastavena jako délka mezi čelistmi L_c 110 mm.

Po změření vzorků se mohlo přejít k tahové zkoušce. Ta se prováděla na elektromechanickém trhacím stroji INOVA 50 kN. Ovládání trhacího stroje a sběr dat bylo prováděno softwarem od firmy SMAPS.



Obr. č. 26 Trhací stroj INOVA 50 kN.

3.4.1 Průběh tahové zkoušky

Jako první krok bylo nastavení trhacího stroje do výchozí polohy se vzdáleností čelistí $L_c = 110$ mm. Při následujících zkouškách se výchozí pozice docílilo pomocí tlačítka *Return* na ovládacím panelu, kdy se stroj automaticky ustavil do počáteční polohy. Nyní se to čelistí trhacího stroje mohl vložit zkoušený vzorek.

Po uchycení vzorku v horní čelisti stroje byly v programu nastaveny počáteční parametry tahové zkoušky. Bylo nutno nastavit tloušťku a šířku testovaného vzorku a rychlost posuvu příčnicku, která byla zvolena 5 mm/min.

Následně byl vzorek důkladně uchycen do spodní čelisti stroje a mohlo se přejít k samotnému tahu. Tento proces se uskutečnil stisknutím tlačítka *Start* na ovládacím panelu stroje. Na displeji počítače se pak dalo sledovat prodloužení a síla, která na vzorek působí.

Po přetržení vzorku se celý proces automaticky zastavil a software vyhodnotil graf, který znázorňoval křivku zobrazující závislost síly v [N] na prodloužení v [mm]. Naměřená data v rámci jedné série vzorků, kterou tvořily tři vzorky, byla exportována do Excelu. Konečný protokol obsahoval výsledné mechanické vlastnosti, jako například pevnost v tahu nebo procentuální prodloužení. Data se pak automaticky ukládala do příslušné složky, díky čemuž se pak dala kdykoliv zpětně načíst.

4 VÝHODNOCENÍ

V tabulce č.4 jsou uvedeny hodnoty maximálního zatížení F_{\max} [N], meze pevnosti v tahu σ_M vztažené k vnějšímu rozměru zkušební tyče o ploše $S_0 \sim 40 \text{ mm}^2$ a tažnosti ε_{tB} , neboli poměrného prodloužení při přetržení.

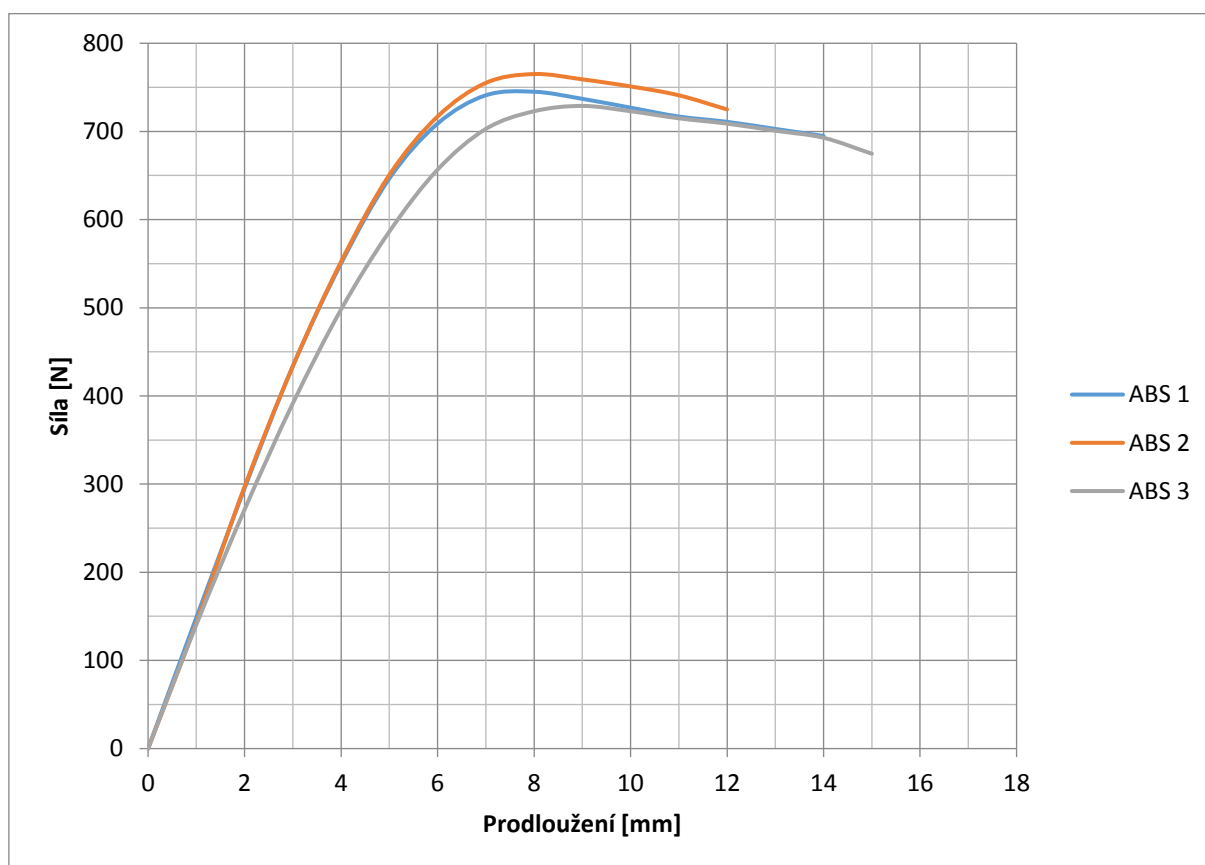
Tab. č. 4 Naměřené hodnoty

Vzorek	F_{\max} [N]	σ_M [Mpa]	ε_{tB} [%]
PLA 1	$1122,5 \pm 55,7$	$28,06 \pm 1,4$	$7 \pm 0,9$
PLA 2	$1106,5 \pm 11,2$	$27,66 \pm 0,3$	$6,56 \pm 0,3$
PLA 3	$1010,7 \pm 63,5$	$25,26 \pm 1,6$	$7,57 \pm 0,8$
ASA 1	$751,0 \pm 22,8$	$18,77 \pm 0,6$	$15,3 \pm 1,1$
ASA 2	$704,2 \pm 18,5$	$17,604 \pm 0,5$	$11,1 \pm 0,6$
ASA 3	$682,1 \pm 20,5$	$17,052 \pm 0,5$	$10,6 \pm 2,7$
HD 1	$1067,6 \pm 56,4$	$26,69 \pm 1,4$	$6,1 \pm 0,6$
HD 2	$1085,7 \pm 26,2$	$27,14 \pm 0,7$	$5,7 \pm 0,9$
HD 3	$1143,9 \pm 63,8$	$28,59 \pm 1,6$	$6,8 \pm 0,3$
CPE 1	$882,2 \pm 30,2$	$22,055 \pm 0,8$	$10,2 \pm 1,4$
CPE 2	$896,9 \pm 21,5$	$22,42 \pm 0,5$	$11,2 \pm 1,9$
CPE 3	$1087 \pm 6,5$	$27,175 \pm 0,2$	$10,3 \pm 0,8$
HDŽ 1	$1075,7 \pm 65,2$	$26,89 \pm 1,6$	$6,6 \pm 0,3$
HDŽ 2	$1083 \pm 58,8$	$27,075 \pm 1,5$	$6,1 \pm 0,4$
HDŽ 3	$1101,8 \pm 65,0$	$27,545 \pm 1,6$	$7,1 \pm 0,2$
ABS 1	$739,0 \pm 21,3$	$18,47 \pm 0,5$	$14,7 \pm 1,1$
ABS 2	$753,7 \pm 13,4$	$18,84 \pm 0,3$	$12,3 \pm 0,9$
ABS 3	$706,8 \pm 28,5$	$17,67 \pm 0,7$	$11,6 \pm 2,0$
PET 1	$882,2 \pm 32,5$	$22,055 \pm 0,8$	$9,29 \pm 0,7$
PET 2	$971,2 \pm 42,6$	$24,28 \pm 1,1$	$8,8 \pm 0,7$
PET 3	$905 \pm 24,2$	$22,625 \pm 0,6$	$9,37 \pm 0,9$

Jak již můžeme z hodnot usoudit, nanášená vrstva tisku měla téměř minimální vliv, a to jak mez pevnosti σ_M , tak poměrné prodloužení při přetržení ε_{tB} . Pro lepší přehlednost byly na základě těchto hodnot vyhotovené grafy.

Následující grafy tahové zkoušky znázorňují závislost síly [N] na prodloužení [mm] daného materiálu. Z každé sady byl vybrán vždy jeden vzorek, zastupující příslušnou vrstvu. Zbytek grafů s výsledky jednotlivých vzorků lze najít v seznamu příloh.

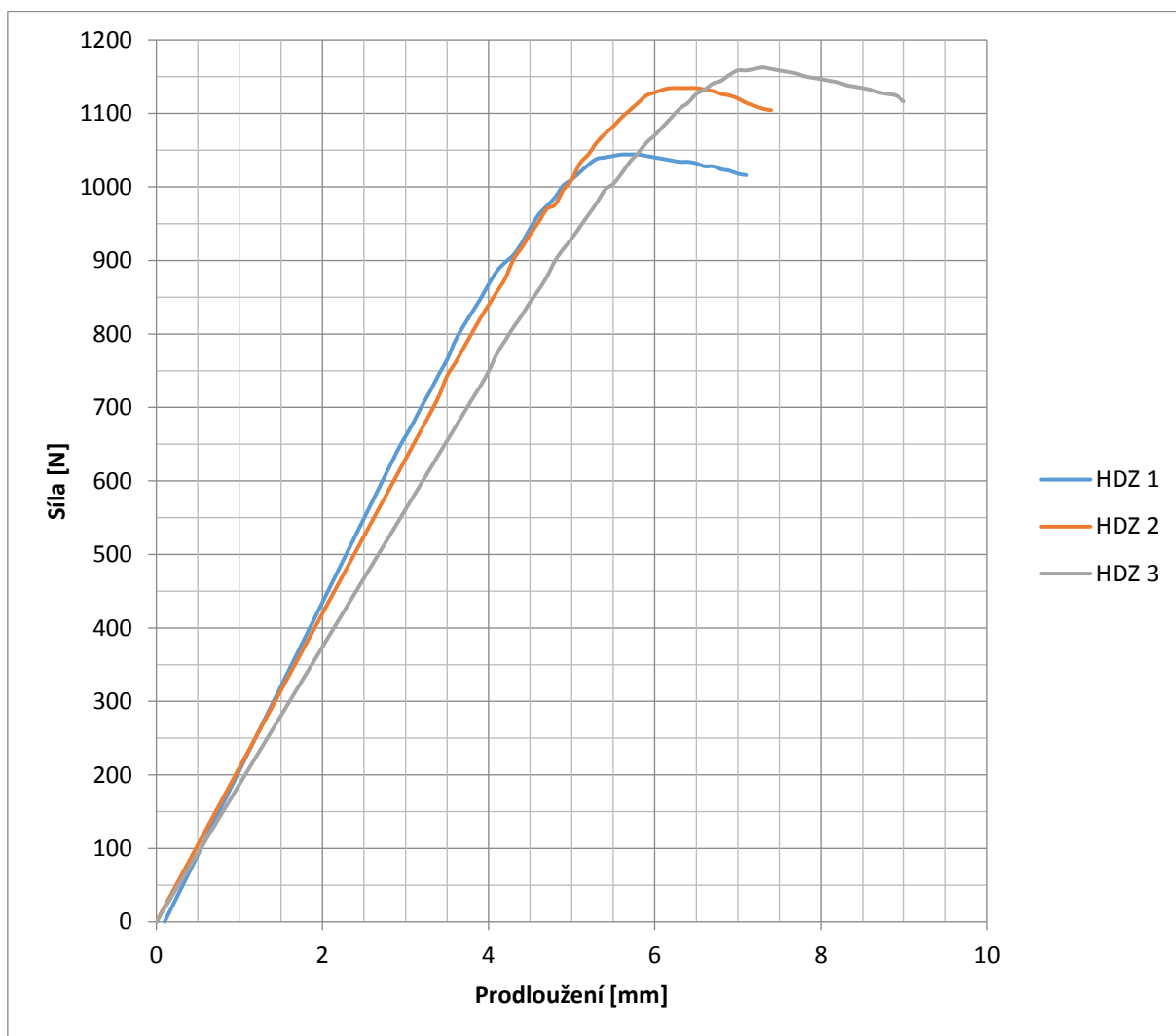
4.1 ABS



Obr. č. 27 graf ABS

Na obrázku č. 27 lze vidět, že největší hodnotu maximálního zatížení dosahuje vzorek označen jako ABS 2 (výška vrstvy = 0,2mm). Můžeme si zde také všimnout, že vzorky nevykazují znatelné rozdíly v prodloužení.

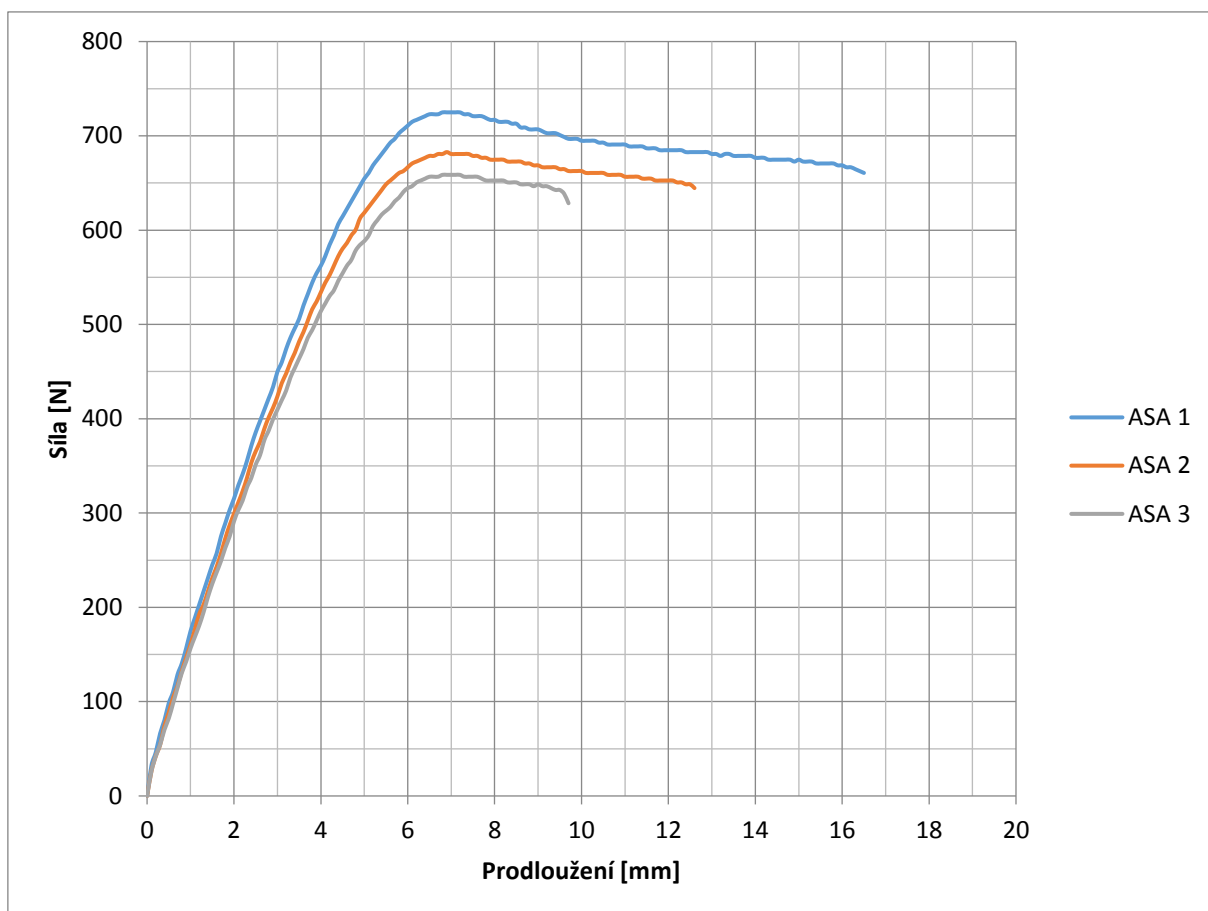
4.2 HDZ



Obr. č. 28 graf HDZ

V tomto případě vykazuje největší hodnotu maximálního zatížení třetí vzorek, tedy vzorek s vrstvou 0,3 mm. Ovšem v porovnání s ostatními vzorky je tento rozdíl, vzhledem k hodnotám směrodatné odchylky jako u většiny materiálů minimální. Ani zde nepozorujeme znatelné rozdíly v prodloužení, vzorky se po dosažení maximální pevnosti téměř ihned přetrhly.

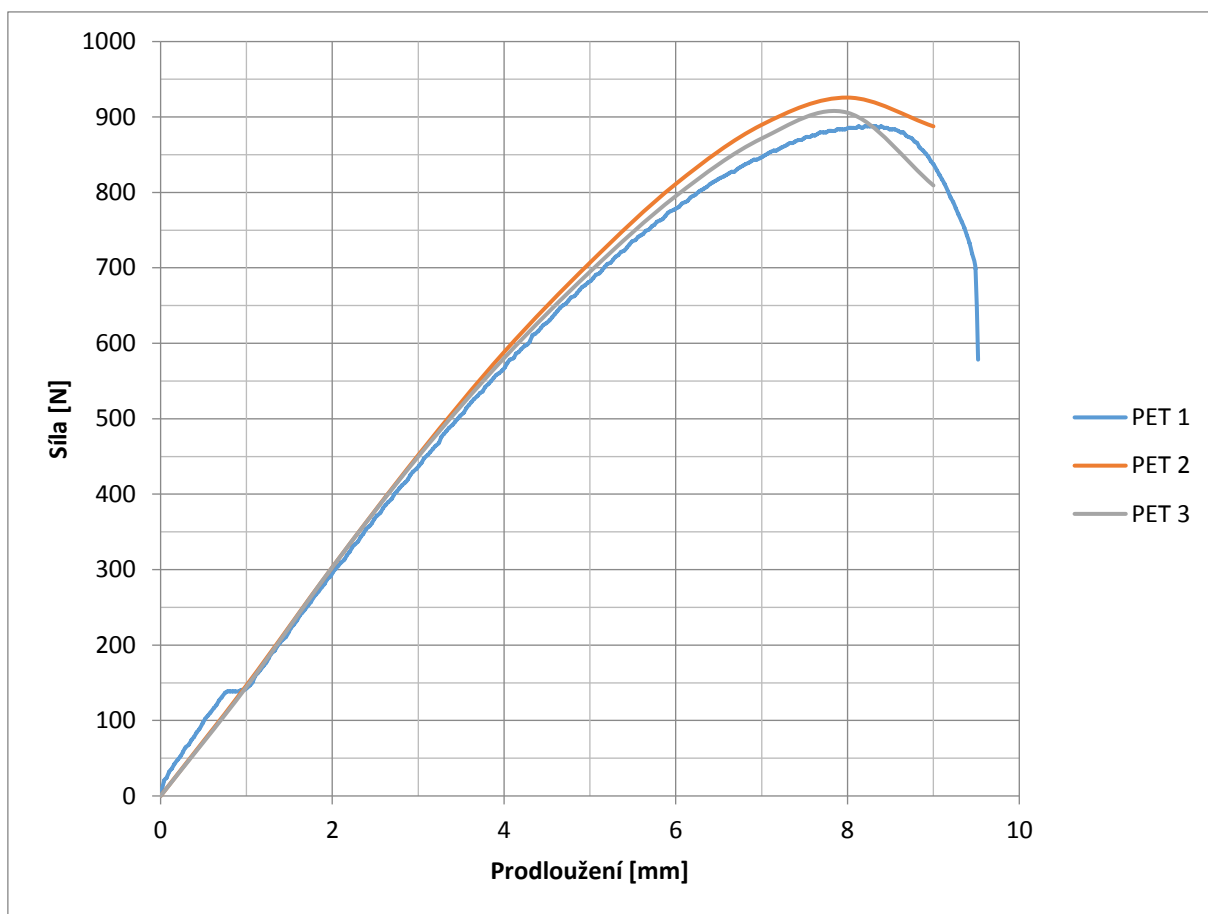
4.3 ASA



Obr. č. 29 graf ASA

Zde můžeme vidět, že největší hodnota maximálního zatížení připadá na vzorek číslo 1, tedy na vzorek s vrstvou 0,1mm. S přibývajícím počtem vrstev pak zatížení i prodloužení nepatrně klesá.

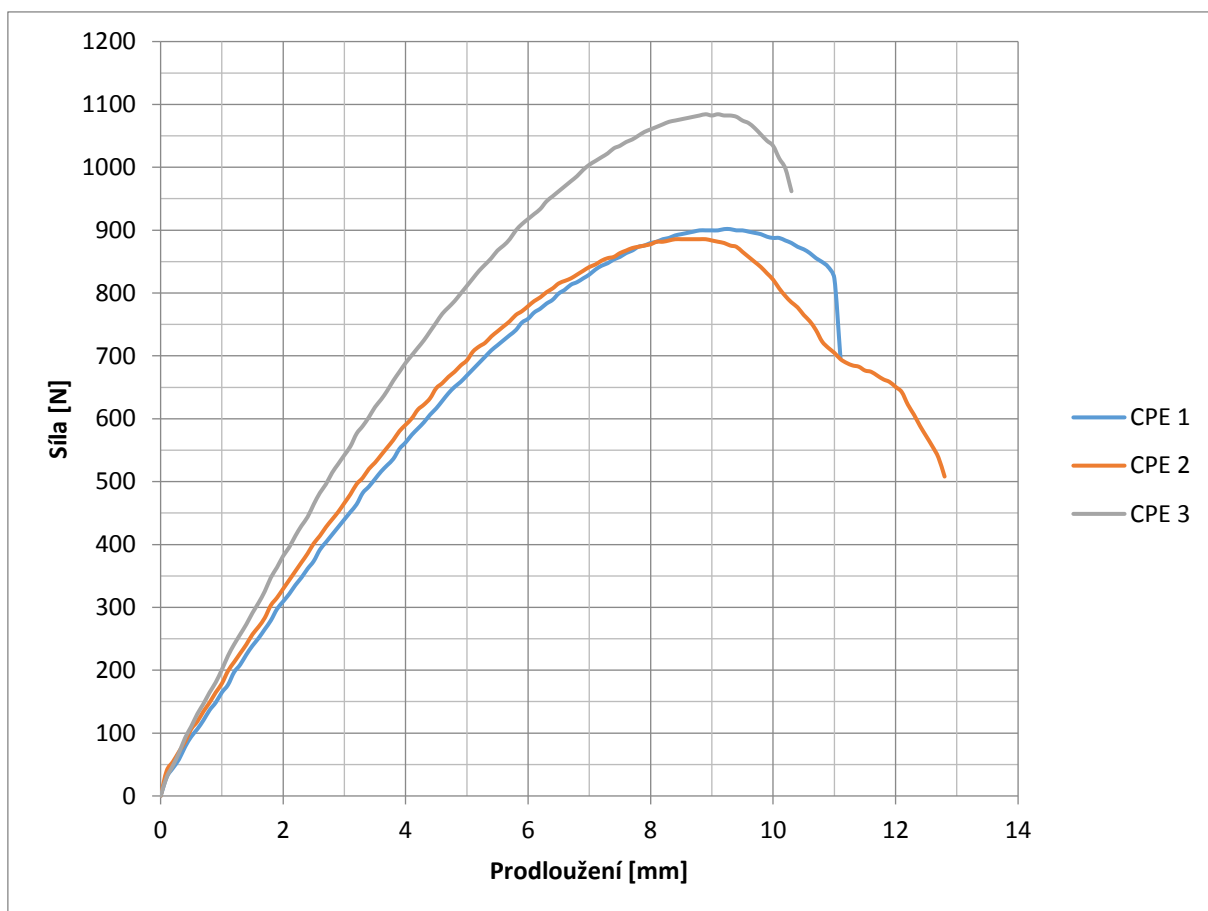
4.4 PET



Obr. č. 30 graf PET

V grafu si můžeme povšimnout, že největšího zatížení dosáhl vzorek s vrstvou tisku 0,2mm, opět ale vidíme, že rozdíl mezi vrstvami je téměř minimální (s přihlédnutím k vypočítané odchylce).

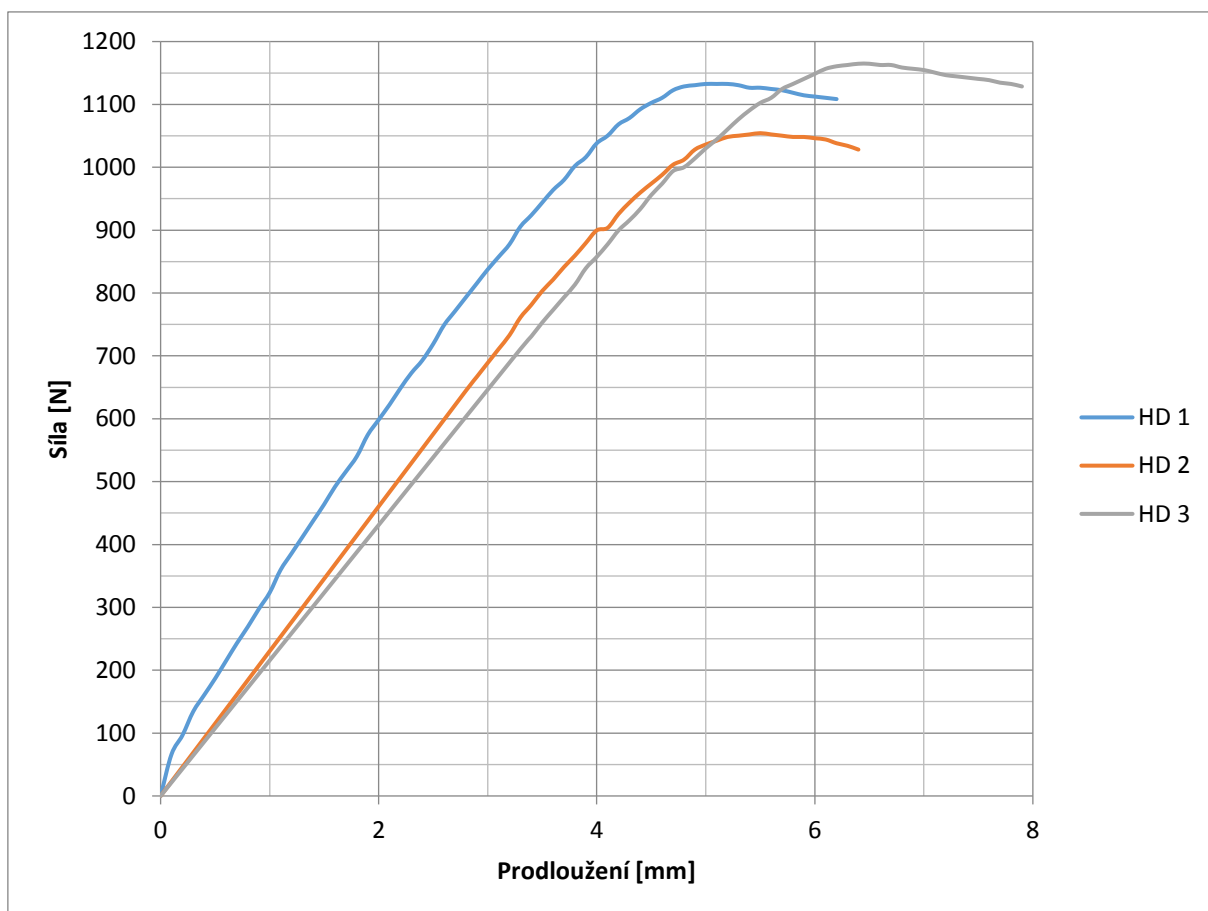
4.5 CPE



Obr. č. 31 graf CPE

Na materiálu CPE můžeme vidět asi nejmarkantnější rozdíl vzorků, kdy vzorek č.3 dosáhl o téměř 200 [N] většího maximálního zatížení, a to nejen na tomto vybraném grafu ale i v průměrných hodnotách, uvedených v tabulce č. 4.

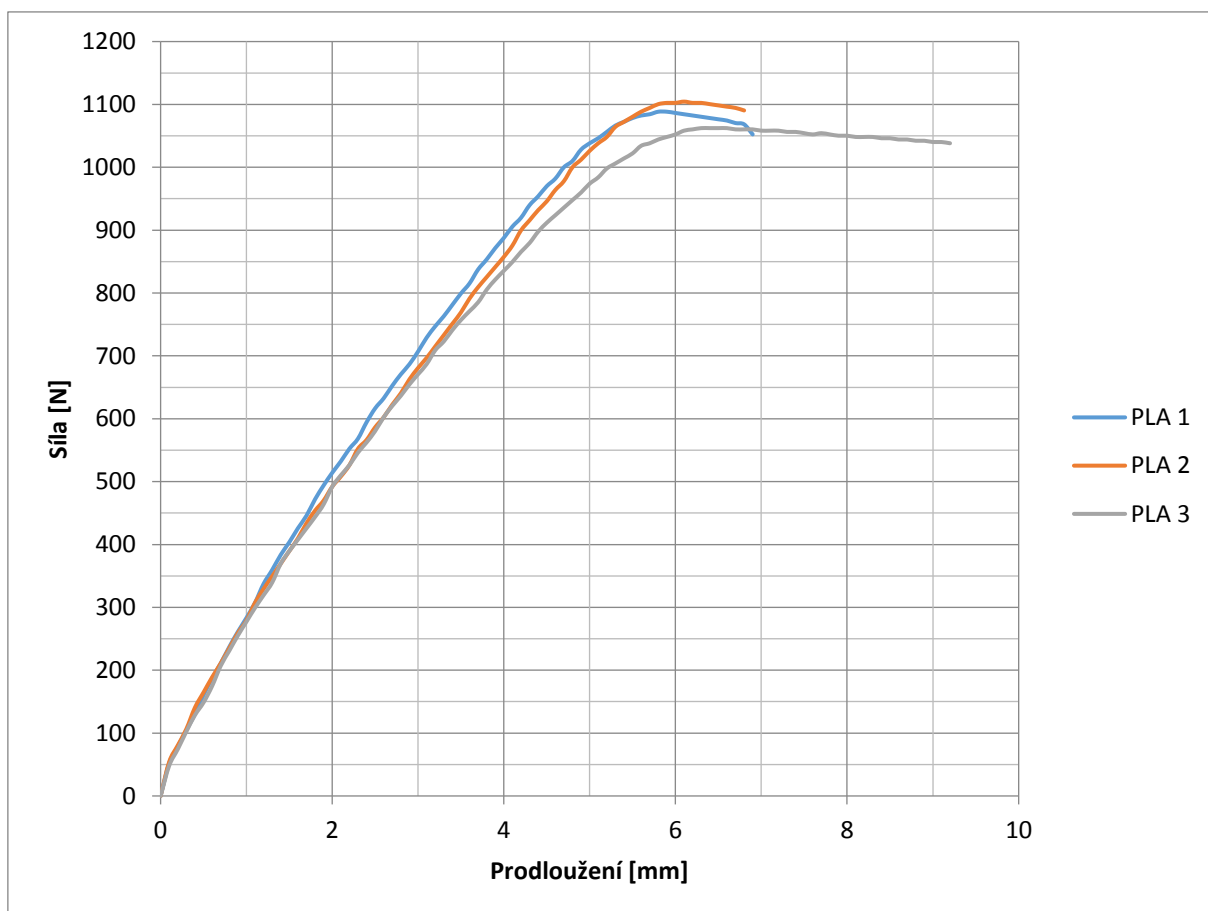
4.6 HD



Obr. č. 32 graf HD

Výsledné hodnoty tohoto materiálu jsou téměř identické s výsledky stejného materiálu, který prošel žíhací úpravou. I zde vykazuje největší hodnotu maximálního zatížení třetí vzorek s vrstvou 0,3mm, avšak s minimálními rozdíly oproti zbývajícím vzorkům, a to i v celkovém prodloužení.

4.7 PLA

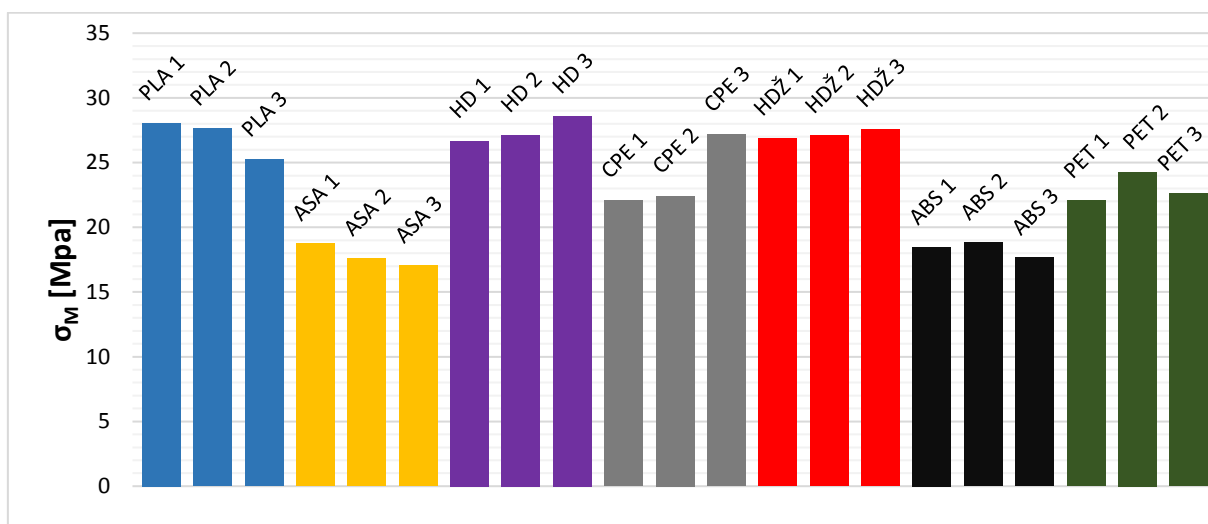


Obr. č. 33 graf PLA

Posledním testovaným materiálem byl materiál PLA. Také v tomto případě vidíme zanedbatelné rozdíly ve výsledných hodnotách, jak v maximálním zatížení, které se v konkrétním případě pohybuje od 1060 do 1105 [N], tak v prodloužení, které v tabulce č.4 činí okolo 7 %.

4.8 Celkové výsledky

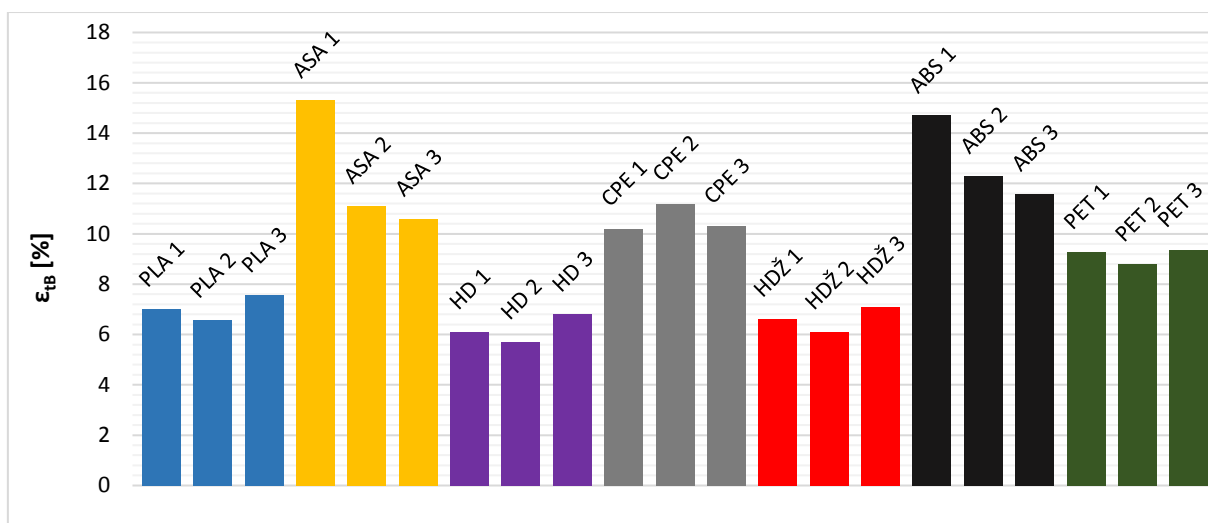
Zde vidíme celkový přehled všech materiálů i vrstev tisku. Z obrázku č. 34 můžeme vyčíst, že největší meze pevnosti v tahu σ_M dosáhly materiály PLA, HD PLA, HD PLA žíhané a materiál CPE s vrstvou tisku 0,3mm. Všechny zmiňované materiály dosáhly hodnot meze pevnosti v tahu nad 25 MPa. Druhou skupinou byly materiály CPE a PET, jejichž hodnoty meze pevnosti v tahu se pohybovaly v rozmezí od 20 do 25 MPa. Poslední skupina zahrnuje materiály ASA a ABS, které dosáhly hodnot maximální meze pevnosti v tahu od 15 do 20 MPa.



Obr. č. 34 Meze pevnosti v tahu

Bavíme-li se o poměrném prodloužení ε_{tB} , vidíme, že materiály PLA, HD PLA, HDŽ PLA a PET s vrstvou 0,2 mm dosahují nejmenšího poměrného prodloužení, porovnáme-li to se vzorky s vrstvou tisku 0,1 a 0,3 mm. Ovšem například u materiálu ASA a ABS lze pozorovat, že největší poměrné prodloužení dosáhly vzorky s výškou vrstvy 0,1 mm. Jak již dříve bylo zmíněno, rozdíly hodnot mezi jednotlivými vrstvami materiálů jsou téměř minimální.

Co se týče celkového zhodnocení, největší poměrné prodloužení bylo zaznamenáno u materiálů ABS, CPE a ASA, které činí přes 10 %. Následuje pak PET, který se pohybuje okolo 9 %. Materiály PLA, HD PLA a HD PLA žíhané dosahují hodnot od 5,5 do 7,5 % celkového prodloužení. (obr. č. 35).



Obr. č. 35 celkové prodloužení

K lomu materiálu dochází bez výrazné lokální plastické deformace. Šíření trhlin u taženějších vzorků kopíruje povrchovou stopu 3D tisku, příkladem je materiál CPE, který můžeme vidět na obrázku (viz obr. č. 36c), a poté dochází k příčnému dolomení (viz obr. č. 36a). U křehčích vzorků dochází k šíření trhliny převážně příčné přes průřez vzorku (viz obr. č. 36b).



Obr. č. 36 Lom a) ASA, b) HD, c) CPE

ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo stanovení mechanických vlastností na vybraných vzorcích, a to za pomoci tahové zkoušky. Ke stanovení těchto vlastností bylo využito 7 polymerních materiálů, používajících se pro 3D tisk technologií FDM.

U každého z těchto sedmi materiálů byly nastaveny 3 různé výšky nanášené vrstvy tisku, při stejné procentuální výplni, která činila 40 %. Vzorky byly navrženy tak, aby vyhovovaly normě ISO 527. Jednotlivé parametry pro tisk vzorků byly nastaveny v programu Simplify 3D a samotný tisk probíhal na tiskárně Prusa MK2.

K určení mechanických vlastností byla provedena zkouška tahem, která se prováděla na elektromagnetickém trhačím stroji značky INOVA 50 kN. Před začátkem této mechanické zkoušky bylo nutno každý vzorek několikrát přeměřit a průměrné hodnoty zadat do programu SMAPS. Rychlost posuvu příčnicku, tedy rychlost, kterou se vzorky trhaly se po pár zkušebních testech nastavila na 5 mm/min.

Získané hodnoty z tahové zkoušky byly zpracovány a na základě těchto hodnot vznikly grafy, které zobrazují mechanické vlastnosti materiálů. Z grafů je patrné, že výška nanášené vrstvy tisku nemá prokazatelný vliv na pevnost ani poměrné prodloužení materiálu. Materiály dosahovaly hodnot, které byly s přihlédnutím k vypočítané odchylce téměř srovnatelné. Také lomy, které u jednotlivých materiálů vznikly, nejevily patrné známky odlišnosti.

V celkovém porovnání jsme jako materiál, který vykazoval největší meze pevnosti v tahu vyhodnotili trojici materiálů PLA, HD PLA a HD PLA žíhané. Tyto materiály vykazovaly průměrné hodnoty meze pevnosti v tahu okolo 27 MPa. Naopak nejméně pevné byly materiály ABS a ASA s průměrnými hodnotami 18,3 MPa a 17,8 MPa.

BIBLIOGRAFIE

- [1] o3d.cz. [Online] [Citace: 2. Únor 2018.] <http://www.o3d.cz/3d-tisk/%C5%A1t%C3%ADtky/historie-3d-tisku/>.
- [2] Live Science. <https://www.livescience.com>. [Online] [Citace: 3. Únor 2018.] <https://www.livescience.com/38862-selective-laser-sintering.html>.
- [3] Craftsmanspace. [craftsmanspace.com](http://www.craftsmanspace.com). [Online] [Citace: 1. Únor 2018.] http://www.craftsmanspace.com/sites/default/files/free-plans-articles/darwin_reprap_3D_printer.jpg.
- [4] Materialpro 3D. <https://www.materialpro3d.cz>. [Online] 4. Únor 2018. <https://www.materialpro3d.cz/3d-tisk-v-kostce/>, https://cs.wikipedia.org/wiki/3D_tisk.
- [5] Simplify 3D. <https://www.simplify3d.com>. [Online] [Citace: 4. Únor 2018.] Obrázek 2. <https://www.simplify3d.com/wp-content/uploads/2016/07/3D-Printer-Beside-Software-Monitor.jpg>.
- [6] Inventor blog. <https://www.inventor3dblog.cz>. [Online] [Citace: 5. Únor 2018.] <https://www.inventor3dblog.cz/3d-tisk-technologie/>.
- [7] Easy cnc. <https://www.easycnc.cz>. [Online] [Citace: 5. Únor 2018.] <https://www.easycnc.cz/inpage/informace-o-technologiich-3d-tisku/>.
- [8] Autoroad. <http://autoroad.cz>. [Online] [Citace: 5. Únor 2018.] <http://autoroad.cz/pictures/article/2013/09/13/1379069846-hdd.png>.
- [9] IT network. <https://www.itnetwork.cz>. [Online] [Citace: 6. Únor 2018.] <https://www.itnetwork.cz/nezarazene/3d-tisk/technologie-3d-tisk>.
- [10] O 3d. <http://www.o3d.cz>. [Online] [Citace: 6. Únor 2018.] <http://www.o3d.cz/3d-tisk/3d-tisk/>.
- [11] Talmar. <http://talmar.masteride.cz>. [Online] [Citace: 5. Únor 2018.] http://talmar.masteride.cz/Modul_EP_pf/img/3Dtisk/3DTisk%20SLS.jpg.
- [12] abc3d. <https://www.abc3d.cz>. [Online] [Citace: 6. Únor 2018.] <https://www.abc3d.cz/o-3d-tisku-neprehlednete/115-3d-tisk-principy-technologie>.

- [13] O 3d. <http://www.o3d.cz>. [Online] [Citace: 5. Únor 2018.] <http://www.o3d.cz/3d-tisk/2013/10/technologie-3d-tisku-i/>.
- [14] <http://blog.nus.edu.sg>. [Online] [Citace: 6. Únor 2018.] <http://blog.nus.edu.sg/u0804594/files/2011/10/LOM-Process.png>.
- [15] DDDrop. <https://www.dddrops.com>. [Online] [Citace: 10. Únor 2018.] <https://www.dddrops.com/wp-content/uploads/2017/06/FDM-technologie-grijs-kader.png>.
- [16] MM spektrum. <https://www.mmspektrum.com>. [Online] [Citace: 12. Únor 2018.] <https://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-10-dil.html>.
- [17] Proto 3000. <https://proto3000.com>. [Online] [Citace: 10. Únor 2018.] <https://proto3000.com/assets/uploads/Materials-Images/FDM.png>.
- [18] 3D tisk. <https://www.3d-tisk.cz>. [Online] [Citace: 10. Únor 2018.] <https://www.3d-tisk.cz/fused-deposition-modeling/>.
- [19] Custompart. <http://www.custompartnet.com>. [Online] [Citace: 10. Únor 2018.] <http://www.custompartnet.com/wu/fused-deposition-modeling>.
- [20] <https://blog-assets.pinshape.com>. [Online] [Citace: 11. Únor 2018.] https://blog-assets.pinshape.com/blog/wp-content/uploads/2015/09/02125819/image-courtesy-of-sd3d.com_.jpg.
- [21] 3D tisk. <https://www.3d-tisk.cz>. [Online] [Citace: 11. Únor 2018.] <https://www.3d-tisk.cz/abs/>.
- [22] 3D struny. <http://www.3dstruny.cz>. [Online] [Citace: 11. Únor 2018.] http://www.3dstruny.cz/Prodavane-materialy-a5_9.htm.
- [23] Ultimaker. <https://ultimaker.com>. [Online] [Citace: 11. Únor 2018.] <https://ultimaker.com/download/67751/TDS%20PC%20v3.010-cze.pdf>.
- [24] Materialpro 3D. <https://www.materialpro3d.cz>. [Online] [Citace: 11. Únor 2018.] <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/pet-g/>.
- [25] Ultimaker. <https://ultimaker.com>. [Online] [Citace: 11. Únor 2018.] <https://ultimaker.com/download/67538/TDS%20Nylon%20v3.011-cze.pdf>.

- [26] Fillamentum . <https://fillamentum.com>. [Online] [Citace: 11. Únor 2018.]
<https://fillamentum.com/products/asa-extrafill-green-grass>.
- [27] Ultimaker. <https://ultimaker.com>. [Online] [Citace: 11. Únor 2018.]
<https://ultimaker.com/download/67656/TDS%20CPE%20v3.010-cze.pdf>.
- [28] Elegant 3D. <https://www.elegant3d.cz>. [Online] [Citace: 11. Únor 2018.]
<https://www.elegant3d.cz/HTPLA-filament-Proto-Pasta-matna-modra-1-75-mm-10-m-d226.htm>.
- [29] Ultimaker. <https://ultimaker.com>. [Online] [Citace: 11. Únor 2018.]
<https://ultimaker.com/download/67830/TDS%20PP%20v1.006-cze.pdf>.
- [30] Mechanické vlastnosti polymerů. <https://publi.cz>. [Online] [Citace: 12. Únor 2018.]
<https://publi.cz/books/180/09.html>.
- [31] www.zam.fme.vutbr.cz. [Online] [Citace: 12. Únor 2018.]
www.zam.fme.vutbr.cz/~vlach/wzm/prednasky/WZ2.doc .
- [32] <https://publi.cz>. [Online] [Citace: 12. Únor 2018.]
<https://publi.cz/books/180/images/pics/61.jpg>.
- [33] ČSN EN ISO 527-1 (640604) *A Plasty - Stanovení tahových vlastností. Část 1, Obecné principy* = *Plastics - Determination of tensile properties. Part 1, General principles*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.:
<http://csnonline.agentura-cas.cz/>
- [34] <http://jhamernik.sweb.cz>. [Online] [Citace: 12. Únor 2018.]
http://jhamernik.sweb.cz/vlastnosti_soubory/image001.gif.
- [35] Fyzikální sekce Matematicko-fyzikální fakulty UK. <http://physics.mff.cuni.cz>. [Online] [Citace: 12. Únor 2018.]
http://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/kurz_fyziky_pro_DS/display.php/kontinuum/2_6.
- [36] Statické zkoušky. <http://home.zcu.cz>. [Online] [Citace: 26. Únor 2018.]
<http://home.zcu.cz/~dyxon/DATA/Nauka%20o%20M/Zkouska.pdf>.
- [37] <https://publi.cz>. [Online] [Citace: 12. Únor 2018.]
<https://publi.cz/books/180/images/pics/66.jpg>.

- [38] Statická zkouška v tlaku . <http://www.sspu-opava.cz>. [Online] [Citace: 12. Únor 2018.] http://www.sspu-opava.cz/UserFiles/File/_sablony/KOM_III/VY_52_INOVACE_J-05-23.pdf.
- [39] Slideplayer. <http://slideplayer.cz>. [Online] [Citace: 12. Únor 2018.] [http://slideplayer.cz/slide/2991640/11/images/19/Zkou%C5%A1ka+ohybem+Pevnost+v+ohybu+\[Mpa\]:.jpg](http://slideplayer.cz/slide/2991640/11/images/19/Zkou%C5%A1ka+ohybem+Pevnost+v+ohybu+[Mpa]:.jpg).
- [40] <https://publi.cz>. [Online] [Citace: 12. Únor 2018.] <https://publi.cz/books/180/images/pics/69.jpg>.
- [41] Testresources. <https://www.testresources.net>. [Online] [Citace: 13. Únor 2018.] <https://www.testresources.net/images/applications/compression-foam-4.jpg>.
- [42] Testresources. <https://www.testresources.net>. [Online] [Citace: 13. Únor 2018.] <https://www.testresources.net/applications/test-types/compression-test/>.
- [43] CG Studio. <https://www.cgstudio.com/3d-model/3d-printer---prusa-i3-mk2-280826>. [Online] [Citace: 12. Duben 2018.] <https://www.cgstudio.com/3d-model/3d-printer---prusa-i3-mk2-280826>.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. č. 1 RepRap tiskárna, převzato z [3]	12
Obr. č. 2 3D software, převzato z [5]	13
Obr. č. 3 SLA tech., převzato z [8].....	14
Obr. č. 4 SLS technologie, převzato z [11]	15
Obr. č. 5 LOM technologie, převzato z [14]	16
Obr. č. 6 FDM technologie, převzato z [15].....	18
Obr. č. 7 Výtisk FDM technologií, převzato z [17].....	18
Obr. č. 8 Polymerní materiál ve formě drátu, namotán na cívce, převzato z [20].....	20
Obr. č. 9 Rozdělení mech. charakteristik, převzato z [32]	25
Obr. č. 10 Vzorek pro tahovou zkoušku, převzato z [34].....	26
Obr. č. 11 Prodloužení, převzato z [37].....	29
Obr. č. 12 a) tříbodový ohyb, b) čtyřbodový ohyb, převzato z [39].....	30
Obr. č. 13 deformační křivka polymeru v ohybu, převzato z [40]	33
Obr. č. 14 umístění vzorku ve zkušebním stroji, převzato z [41].....	34
Obr. č. 15 graf tlakové zkoušky (závislost napětí na poměrném stlačení), převzato z [30].....	35
Obr. č. 16 vzorek tahové zkoušky	36
Obr. č. 17 Prusa MK 2, převzato z [43].....	37
Obr. č. 18 Nastavení – Extruder	40
Obr. č. 19 Nastavení vrstev	41
Obr. č. 20 Mřížový vzor výplně	42
Obr. č. 21 Nastavení úhlu	42
Obr. č. 22 Nastavení teploty	43
Obr. č. 23 Nastavení rychlosti	44
Obr. č. 24 Pec CLASIC 3013L.....	45
Obr. č. 25 Displej pece	46
Obr. č. 26 Trhací stroj INOVA 50 kN.....	47
Obr. č. 27 graf ABS	50
Obr. č. 28 graf HDZ.....	51
Obr. č. 29 graf ASA.....	52
Obr. č. 30 graf PET.....	53

Obr. č. 31 graf CPE	54
Obr. č. 32 graf HD	55
Obr. č. 33 graf PLA	56
Obr. č. 34 Meze pevnosti v tahu.....	57
Obr. č. 35 celkové prodloužení.....	58
Obr. č. 36 Lom a) ASA, b) HD, c) CPE	58

SEZNAM PŘÍLOH

1. Příloha: Grafy vzorků

